

**INSTITUTO ENSINAR BRASIL
FACULDADE DOCTUM DE JOÃO MONLEVADE**

**MAICON CESAR DE PÁDUA
JONATA DA CRUZ**

ANÁLISE DA GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA ATRAVÉS DO BIOGÁS

JOÃO MONLEVADE

2019

MAICON CESAR DE PÁDUA

JONATA DA CRUZ

FACULDADE DOCTUM DE JOÃO MONLEVADE

ANÁLISE DA GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA ATRAVÉS DO BIOGÁS

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia Elétrica da Faculdade Doctum de Ensino de João Monlevade, como requisito parcial à obtenção do título de bacharel em Engenharia Elétrica.

Área de concentração: Sistemas de Potencia.

Orientador: Prof. Dr.^a Thaís de Fátima Araújo Silva

**JOÃO MONLEVADE
2019**



FACULDADE DOCTUM DE JOÃO MONLEVADE

FOLHA DE APROVAÇÃO

O Trabalho de Conclusão de Curso intitulado: ANÁLISE DA GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA ATRAVÉS DO BIOGÁS elaborado pelos alunos MAICON CESAR DE PÁDUA e JONATA DA CRUZ, foi aprovado por todos os membros da Banca Examinadora e aceita pelo curso de Engenharia Elétrica da Faculdade Doctum de João Monlevade, como requisito parcial da obtenção do título de

BACHAREL EM ENGENHARIA ELÉTRICA.

João Monlevade, 05 de agosto 2019

Thaís de F. Araújo Silva
Prof. Dr.^a Thaís de Fátima Araújo Silva

Bráulio Frances Barcelos
Prof. Bráulio Frances Barcelos 1

Hernani de O.S. Filho
Prof. Hernani de O.S. Filho 2

AGRADECIMENTOS

Maicon Cesar de Pádua

Agradeço a Deus, meu Amigo fiel, por seu amor incondicional e pelas orações atendidas. A meus pais: Agilenio Alves de Souza e Marcilene Piedade de Pádua Sousa, que renunciaram aos seus sonhos para realização dos meus. À minha família "PÁDUA", em especial minha tia Marlene e minha prima Júlia, pelo apoio nos momentos de dificuldade. Aos professores e mestres, que ao longo desses cinco anos instruíram para que esse dia chegasse. Aos meus colegas de classe, que sempre me deram apoio nos momentos de angústia e à professora Thaís Araújo, pelo apoio acadêmico.

A todos, meus sinceros obrigados!

Jonata da Cruz

Agradeço primeiramente a Deus, que mesmo nas lutas, não me deixou faltar nada a Ele toda honra e toda glória. Agradeço aos meus pais, Francisco da Cruz e Aparecida de Fátima Silva Cruz e também minha à namorada Joelly Cristine Silva Nascimento, por todo amor e apoio oferecido em todos os momentos dessa jornada. Às amigas que construí ao longo desse percurso acadêmico. Obrigado por cada momento de conhecimento compartilhado. Agradeço à professora orientadora, Thaís Araújo, por toda sua dedicação em nos aconselhar, motivar e cobrar para que este trabalho chegasse à um excelente nível de qualidade. Enfim, agradeço a cada um que me incentivou a persistir nessa trajetória.

A todos o meu muito obrigado.

ABREVIATURAS E SIGLAS

ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica.
Bs - Interação ao Campo Magnético do Estator.
Br - Interação ao campo Magnético do Rotor.
CB - Custo do Biogás.
Ce - Custo da Eletricidade Gerada via Biogás.
CAB - Gasto Anual de Biogás.
CAD - Custo Anualizado de Investimento no Biodigestor.
CAG - Custo Anualizado de Investimento no Grupo Gerador.
CETESB – Companhia Ambiental do Estado de São Paulo.
CIB - Custo de Investimento no Biodigestor.
CIG - Custo de Investimento no Grupo Gerador.
CI - Custo de Investimento no Sistema Biodigestor/Gerador-Motor.
C/N - Relação Carbono Nitrogênio.
CNB - Consumo por Gerador de Motores de Biogás.
COV – Carga Orgânica Volumétrica.
CSTR – Continuous Stirred Tank Reactor.
DQO – Demanda Química de Oxigênio.
EPA – Environmental Protection Agency.
ETE – Estações de Tratamento de Esgoto.
ERBR – Energias Renováveis.
FEM – Fundação Estadual do Meio Ambiente.
FRC - Fator de Recuperação de Capita.
GD – Geração Distribuída.
GEE – Gases de Efeito Estufa.
IEA – International Energy Agency.
LANDGEM – Landfill gas emissions model.
MCI – Motor de Combustão Interna.
MME – Ministério de Minas e Energia.
MTG – Microturbinas a Gás.
PAB - Produção Anual de biogás.
PB - Produção de Biogás.

PCH – Pequenas Centrais Hidrelétricas.

PCI – Poder Calorífico do Biogás.

P&D – Pesquisa e Desenvolvimento.

PEMFC - Proton Exchange Membrane Fuel Cell.

PIB – Produto Interno Bruto.

PE - Produção de Eletricidade dos Geradores a Biogás.

PNRS – Política Nacional de Resíduos Sólidos.

PRODIST – Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional.

PCT – Pequena Central Termelétrica.

PTCE – Potencial Técnico de Conversão/Geração de Eletricidade.

PTE - Potencial Teórico de Produção de Eletricidade.

RSU – Resíduos Sólidos Urbanos.

SV – Sólidos Voláteis.

SOFC – Solid Oxid Fuel Cells.

TG – Turbina a Gás.

TRH – Tempo de Retenção Hidráulica.

UASB – Up-flow Anaerobic Sludge Blancket.

SÍMBOLOS

fp – Fator de Potência.

f_{se} – Frequência Elétrica nos Enrolamentos do Estator.

GWh – Gigawatt-hora.

$h_{1,2,3,4}$ – Valores de Entalpia Específica Obtida pelo Diagrama T-s.

H_2S – Ácido Sulfídrico.

H_2O – Água.

HP – Horse Power.

I_L – Corrente de Linha.

J – Taxa de Juros.

k – Razão dos Calores Específicos.

kWe – Potência Elétrica.

Kg – Quilograma.

$\frac{kJ}{kg}$ – Quilo joule por Quilograma.

KW – Quilo Watts.

\dot{m} – Massa por Unidade de Tempo.

\dot{m}_c – Vazão Mássica de Combustível.

MJ – Megajoule.

MJ/m³ – Megajoule por Metro Cubico.

MW – Mega Watts.

Nm³/dia – Normal Metro Cubico Dia.

O₂ – Oxigênio..

PH – Potencial Hidrogeniônico.

RPM – Rotações por Minuto.

T-s – Temperatura em Função da Entropia.

TWh – Terawatt-hora.

V – Volume.

V – Vazão Volumétrica de Biogás

V_L – Tensão de linha.

\dot{W} – Trabalho Mecânico Usado ou Gerado pelo Sistema

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Etapas de produção do biogás	24
Figura 2 – Esquema básico dos biodigestores.....	26
Figura 3 – Esquema básico do biodigestor modelo Indiano	27
Figura 4 - Biodigestor tipo indiano em corte.....	28
Figura 5 - Esquema básico do biodigestor modelo Chinês	30
Figura 6 – Biodigestor tipo Chinês em corte.....	30
Figura 7 – Biodigestor tipo Residencial Estufa em corte	32
Figura 8 - Fluxograma para as possibilidades de utilização do biogás	43
Figura 9 - Ciclo Brayton e diagrama T-s.....	45
Figura 10 - Ciclo de Rankine Básico e Diagrama T-s.....	49
Figura 11 - Os principais componentes das termoelétricas de ciclo combinado	53
Figura 12 – Exemplificação esquemática do Ciclo Combinado.....	54
Figura 13 - Ciclo Otto de 4 tempos.....	56
Figura 14 - Ciclo padrão de ar Otto: a) Diagrama P-V; b) Diagrama (T-s)	57
Figura 15 - Esquemática de um gerador síncrono elementar.....	61
Figura 16 - Equipamentos da operação de um conjunto motor gerador	65
Figura 17 - Sistema de Geração Distribuída	74
Figura 18 - Procedimentos para GD utilizando biogás	76
Figura 19 - Geração distribuída a partir da suinocultura	77
Figura 20 - Vista geral do sistema de monitoramento da cogeração da ETE Arrudas de Sabará (MG).....	80
Figura 21 - Cenários de recuperação energética	81
Figura 22 - Fluxograma das etapas de aproveitamento energético do biogás nas agroindústrias.....	88

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Gráfico de levantamento	15
Gráfico 2 - Crescimento da energia renovável no período de 1990-2015	17
Gráfico 3 - Produção média de biogás por aplicação – 2015 (mil Nm ³ /dia)	18
Gráfico 4 – Potencial de Usina de biogás no setor de abate.....	89
Gráfico 5– Potencial de Usina de biogás no setor de laticínios	85

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Composição do Biogás	22
Tabela 2 - Composição média do biogás proveniente de diferentes resíduos orgânicos.....	33
Tabela 3 - PCI de diferentes gases	34
Tabela 4 - Estimativa da capacidade de produção do biogás com relação a alguns dejetos de animais	34
Tabela 5 - Potencial para a produção de biogás e eletricidade utilizando diversos tipos de resíduos no Brasil	35
Tabela 6 - Frequência elétrica gerada em função da velocidade síncrona e do número de polos.....	62
Tabela 7 - Especificações de motores geradores a biogás de acordo com o fabricante.....	66
Tabela 8 – Potência da geração por RSU no Brasil	85
Tabela 9 - Comparativo de custos de implementação de geração de eletricidade por tipologia de fontes renováveis	86
Tabela 10 - Geração de eletricidade e calor a parti de 11340 MJ de biogás	91

RESUMO

Nas últimas décadas, fontes alternativas de produção de eletricidade têm sido objeto de pesquisa em diversos países do mundo. Dentre elas, o biogás tem-se destacado em função dos inúmeros benefícios que podem ser obtidos a partir do seu uso. Produzido a partir da digestão anaeróbica de resíduos sólidos ou líquidos, o biogás consiste em uma mistura de vários gases no qual o dióxido de carbono e metano estão em maiores proporções. A capacidade energética do biogás permite que seja aproveitado em unidades geradoras de eletricidade, que operam sob diferentes formas de conversão da energia e que utilizam diferentes tipos de matéria orgânica. No Brasil, a utilização do biogás na geração de eletricidade, possui um potencial para promover a diversificação da matriz elétrica nacional que é extremamente dependente das fontes hídricas. Além disso, o biogás apresenta-se também como uma alternativa viável na melhora do gerenciamento dos resíduos domésticos, agrícolas e industriais. Diante do exposto, o presente trabalho busca apresentar o estudo acerca dos fundamentos presentes no aproveitamento do biogás, para geração de eletricidade. Durante o texto serão abordadas as perspectivas e realidades no uso atual desse combustível, os processos anaeróbicos necessários à sua formação e às interferências sofridas; as infraestruturas que podem ser utilizadas e seus componentes e princípios de operação.

Palavras-chave: Biogás. Fontes Renováveis. Geração de Eletricidade.

ABSTRACT

In recent decades, alternative sources of electricity production have been the subject of research in several countries around the world. Among the possible alternatives, biogas has stood out due to the innumerable benefits that can be obtained from its use. Produced from the anaerobic digestion of solid or liquid waste, biogas consists of a mixture of various gases in which carbon dioxide and methane are in the largest proportions. The energy capacity of biogas allows it to be used in electricity generating units that operate under different forms of energy conversion and which use different types of organic matter. In Brazil, the use of biogas in the generation of electricity has the potential to promote the diversification of the national electricity matrix, which is extremely dependent on water sources. In addition, biogas is also a viable alternative in improving the management of domestic, agricultural and industrial waste. In view of the above, the present work seeks to present a theoretical study about the foundations of the use of biogas for electricity generation. During the text the perspectives and realities in the current use of this fuel are discussed, the anaerobic processes necessary for its formation and the interferences suffered, the infrastructures that can be used and its components and principles of operation.

Keywords: Biogas. Electricity Generation. Renewable Sources.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	15
1.2 Objetivo	19
1.2.1 Objetivos Específicos	19
1.3 Estruturas do Trabalho	19
2 METODOLOGIA	20
3 FUNDAMENTOS TEÓRICOS E PRÁTICOS SOBRE BIOGÁS	22
3.1 Conceitos de Biogás	22
3.2 Processos de Obtenção do Biogás	23
3.3 Modelos de Biodigestores	26
3.3.1 Modelo Indiano	26
3.3.2 Modelo Chinês	29
3.3.3 Modelo Residencial Estufa ou Batelada	31
3.4 Biogás Como Combustível	33
3.4.1 Fatores de Interferência na Produção do Biogás	36
3.4.2 A Purificação do Biogás	38
3.4.3 Combustão do Biogás	38
3.5 Características de Manejo e Dimensionamento do Biodigestor	39
3.5.1 Carga Orgânica Volumétrica (COV)	40
3.5.2 Tempo de Retenção Hidráulica (TRH)	41
4 PRINCÍPIOS E TECNOLOGIAS DE APROVEITAMENTO ENERGÉTICO DO BIOGÁS NA GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA	42
4.1 Máquinas Térmicas	44
4.2 Ciclos Termodinâmicos e Tecnologias para Conversão de Energia	44
4.2.1 Turbinas de Ciclo Brayton	45
4.2.1.1 <i>Equações analíticas do Ciclo Ideal de Brayton</i>	47
4.2.2 Turbinas de Ciclo Rankine	48
4.2.2.1 <i>Equações analíticas do Ciclo Ideal de Rankine</i>	50
4.2.3 Ciclos Combinados	52
4.2.4 Motores de Combustão Interna do ciclo de Otto	55
4.2.4.1 <i>Equações analíticas do Ciclo Ideal de Otto</i>	57
4.2.5 Comparativo Entre as Tecnologias de Conversão	58
4.3 Geradores de Eletricidade	60

4.3.1 Grupo Motor Gerador	64
4.3.1.1 <i>Crêterios de Desempenho e Dimensionamento dos Conjuntos Geradores a Biogás</i>	66
4.4 Fatores Econ�micos de Análise da Produ�o de Biogás em Unidades Geradoras de Eletricidade	68
4.5 Gera�o de Eletricidade com Biogás	72
4.5.1 Gera�o Distribuída e as Políticas Públicas de Fomento a Utiliza�o do Biogás no Brasil	73
4.6 Aproveitamentos de fontes de energia elétrica através de centrais a biogás	77
4.6.1 Gera�o de energia elétrica através do biogás proveniente das esta�es de tratamento de efluentes.....	78
4.6.2 Gera�o de energia elétrica através do biogás proveniente dejetos de animais	82
4.6.3 Gera�o de energia elétrica através do biogás proveniente dos resíduos sólidos urbanos	84
4.6.4 Gera�o de energia elétrica através do biogás proveniente da Agricultura	87
4.6.5 Comparativo de aplicabilidade do biogás	90
5 CONCLUSÃO	93
REFERÊNCIAS.....	95
ANEXO A.....	102
ANEXO B.....	103
ANEXO C.....	104

1 INTRODUÇÃO

A geração de energia elétrica é uma questão presente desde os tempos mais remotos e a, partir, da Revolução Industrial, assumiu papel de vital importância para o processo produtivo dos polos industriais da época.

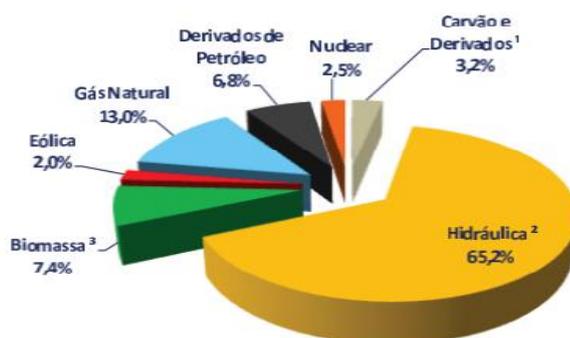
A primeira fase da Revolução Industrial trouxe o aperfeiçoamento das máquinas a vapor, que acelerou a produção industrial, utilizando combustível à base de derivados de petróleo para o funcionamento das máquinas a vapor. Contudo, com o forte aumento populacional e alta demanda de produtos, fez-se necessária a utilização de máquinas elétricas como forma de aumentar a produção da época, tornando-se uma das principais inovações para o período da segunda etapa da revolução Industrial.

A energia elétrica tornou-se então, de suma importância para o desenvolvimento industrial e para as empresas de prestação de serviços, que dependem dos grandes polos.

As atividades industriais se baseavam nos processos de produção que visavam transformar matérias-primas em mercadorias, utilizando-se de máquinas elétricas. Nesse contexto, surgiram problemas relacionados à alta demanda por energia elétrica para o funcionamento dessas indústrias. Houve então a necessidade de utilizar fontes para geração de energia elétrica, em sua maioria, não renováveis e de alto custos.

Sabe-se que o recurso energético mais utilizado no Brasil é o hídrico. De acordo com os dados levantados pelo (MME, 2015) Gráfico 1 são quase 62,5% de toda energia elétrica produzida no Brasil.

Gráfico 1 – Gráfico de levantamento



Fonte: MME (2015)

Justifica-se que tenha sido o recurso mais aproveitado pelo fato de o país apresentar o terceiro maior potencial hídrico do mundo. Entretanto, apesar de ser uma fonte de energia renovável e de não emitir poluentes, esta energia não está isenta de gerar impactos ambientais e sociais.

Outro ponto relevante sobre a matriz energética proveniente da água no Brasil, foi a crise hídrica em 2001, quando a falta de chuva provocou o baixo nível de nos reservatórios das usinas, e fez com que faltasse energia elétrica. Para contornar tal situação, houve a ativação de usinas termoeletricas movidas a carvão, óleo e a gás; que a apresentaram uma produção, obviamente, não suficiente de energia elétrica, além de ter um custo relativamente mais alto para sua geração. Outro fator importante que deve ser observado para uso da matriz energética hídrica, é o espaço utilizado para o represamento de rios para a construção das barragens. Ele é ocupado por áreas de reservas florestais, ricas em fauna e flora, que contribuem para a manutenção da vida em determinadas áreas. São habitat de comunidades indígenas e populações tradicionais que possuem laços afetivos que influenciam em sua adaptação em caso mudanças.

Assim, tem-se a necessidade de pensar em novas alternativas para que as indústrias possam continuar produzindo sem se preocuparem com as crises hídricas e os impactos ambientais referentes outras matrizes energéticas poluentes e de alto custo.

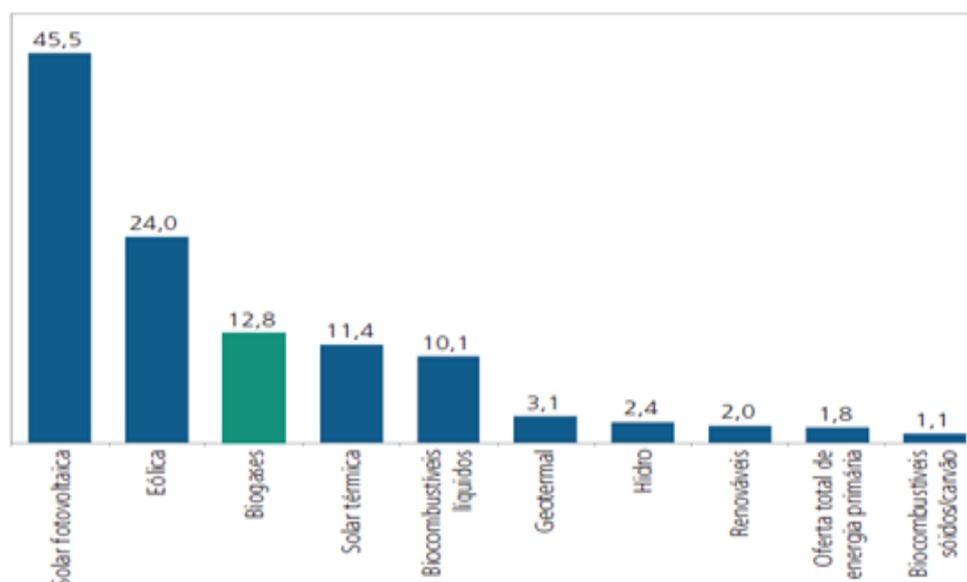
Levando-se em consideração a necessidade de mudança na produção de energia no mundo, a partir da utilização de fontes renováveis, o biogás apresenta-se como alternativa capaz de promover a geração de energia elétrica e redução de gases do efeito estufa. A inclusão do biogás no plano de expansão da energia elétrica sinaliza que essa energia deverá emergir, nos próximos anos, como uma das principais formas de produção de energia renovável. Como existem diversas opções de substratos para a sua produção, é de se esperar que com o aprimoramento das tecnologias específicas, o crescimento seja ainda mais relevante.

Anualmente, a biodegradação natural de matéria orgânica em condições anaeróbicas, libera entre 590 milhões e 800 milhões de toneladas de metano na atmosfera. Os sistemas de recuperação do biogás exploram esses processos

bioquímicos para decompor vários tipos de substrato, aproveitando o biogás liberado como fonte de energia em diferentes processos de geração e cogeração.

De acordo com os dados da *International Energy Agency* - IEA (2017, apud Milanez *et al.*, 2018), o biogás ainda é uma parcela pouco significativa na produção primária de energia no mundo. Em 2015, menos de 0,3% do total produzido foi originada do biogás. Contudo, esse combustível vem se destacando como a terceira fonte de energia renovável com a maior taxa de crescimento anual no período de 1990-2015, conforme ilustrado no Gráfico 2 a seguir.

Gráfico 2 - Crescimento da energia renovável no período de 1990-2015

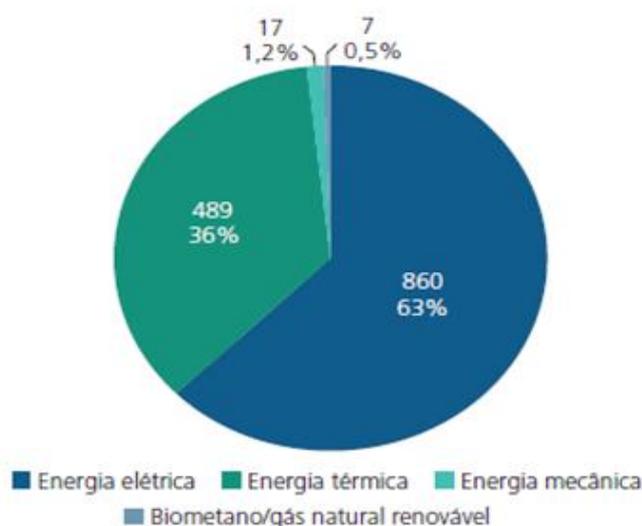


Fonte: IEA (2017, apud Milanez *et al.*, 2018)

Hoje, no Brasil, é gerada uma expressiva quantidade de biomassa resultante da colheita e do processamento de produtos agropecuários. Portanto, o reaproveitamento da biomassa remanescente da agricultura e agroindústria para a produção de biogás, além de evitar a acumulação de resíduos, é fundamental para reduzir a dependência de fertilizantes químicos importados. Isso se dá porque a tecnologia do biogás pode ser um coproduto, viabilizando a sustentabilidade do crescimento da produção agrícola. Os incentivos para projetos de geração, de energia elétrica, a partir do biogás, atendem parte dos compromissos firmados pelo Brasil em recentes acordos climáticos globais acerca da redução da emissão de GEEs, bem como, o aumento da participação da bioenergia sustentável na sua matriz energética. As principais fontes de produção de biogás em escala comercial

no Brasil, são: a parcela orgânica dos resíduos sólidos urbanos (RSU); rejeitos da produção de açúcar e etanol de cana; e dejetos da pecuária suína. Em menor escala, resíduos da produção de alimentos em geral, (amido de mandioca e suco de laranja); descarte de restaurantes; grama (caso de Itaipu); dejetos da pecuária bovina e avícola e efluente sanitário. Independentemente da matéria-prima utilizada, a produção do biogás representa uma oportunidade de transformação de resíduos indesejados em fontes de energia, matéria-prima para fertilizantes e outros subprodutos economicamente aproveitáveis. A quase totalidade da produção de biogás no Brasil gera energia elétrica ou térmica, como se vê no Gráfico 3.

Gráfico 3 - Produção média de biogás por aplicação – 2015 (mil Nm³/dia)



Fonte: Milanez *et al.* (2018)

Assim, diante das informações e dados apresentados, a presente monografia se justifica pela necessidade de alinhar teoria e prática na atuação do engenheiro eletricitista. Na busca pelo desenvolvimento e fomento de alternativas energéticas mais limpas, renováveis e com maior eficiência econômica para as atividades humanas, é apresentado o uso do biogás como fonte geradora movida pelos ciclos aberto, fechado e combinado para geração de energia elétrica, a partir de resíduos sólidos líquidos.

1.2 Objetivo

O presente trabalho tem como principal objetivo realizar um estudo teórico acerca dos fundamentos presentes na utilização do biogás, como fonte de geração de energia elétrica, apresentando diferentes modelos de produzir essa fonte de energia sustentável.

1.2.1 Objetivos Específicos

- Apresentar os conceitos da formação do biogás a partir da biodigestão anaeróbica, fatores físico-químicos, que influenciam sua a formação biogás como fonte alternativa de produção de eletricidade;
- Dissertar sobre os processos de utilização do biogás para a geração de energia elétrica;
- Analisar a geração de energia, através do biogás, comparando as facilidades e dificuldades de cada processo;
- Apresentar diferentes modelos de geração de energia elétrica, através digestão anaeróbica;
- Demonstrar o potencial de utilização para o Biogás no setor de geração de energia elétrica.

1.3 Estruturas do Trabalho

A seção 1 apresenta uma introdução sobre o tema central dessa monografia: o biogás como fonte alternativa para produção de eletricidade. É exposto um panorama geral que evidencia a relevância do tema tratado e das informações apresentadas. Mostram também, o potencial de expansão do uso do biogás nos próximos anos, servindo como motivação para desenvolvimento desse.

A seção 2 apresenta uma síntese dos conceitos da formação do biogás, a partir da biodigestão anaeróbica, fatores físico-químicos que influenciam sua formação, formas construtivas de alguns biodigestores convencionais, seu potencial energético frente a outras formas e fontes de energia e parâmetros relacionados ao manejo dos resíduos a serem bioprocessados.

Já a seção 3, traz uma visão geral acerca das informações sobre o aproveitamento do biogás para geração de eletricidade. Os tópicos tratados são resultado de uma metodologia de pesquisa que teve por objetivo, a partir das pesquisas realizadas e dos autores citados, destacar os princípios e processos de conversão energética do biogás em eletricidade. Para isso, apresentou-se uma síntese dos ciclos termodinâmicos do qual se fundamenta a base do aproveitamento energético do biogás, as principais tecnologias e máquinas utilizadas e um comparativo entre elas, como também critérios para dimensionamento e variáveis do processo de um sistema eletromecânico.

2 METODOLOGIA

A metodologia empregada na elaboração dessa monografia consistiu no levantamento de informações e dados por meio de pesquisa bibliográfica referente ao tema de aproveitamento energético do biogás como fonte alternativa para geração de eletricidade. O agrupamento e interpretação das informações voltadas ao propósito desse trabalho e que são explicitadas no texto ocorreu por meio da consulta de artigos científicos, livros, teses, documentos, manuais, sites governamentais e empresariais, dentre outros. A pesquisa foi realizada através da *World Wide Web* com preferência a textos mais recentes da atualidade. As palavras-chave utilizadas para realização dessa pesquisa foram em maior parte: aproveitamento/uso energético biogás; geração de eletricidade com biogás; tecnologias de conversão aplicadas a biogás; digestão anaeróbica do biogás; biodigestores; geração distribuída com biogás, dentre outros.

Na implementação da proposta do trabalho, primeiramente foi feita uma revisão dos processos de formação do biogás, apresentando as reações químicas e os fatores e parâmetros envolvidos em sua obtenção. Ainda, na abordagem inicial destacou-se alguns modelos de biodigestores que são utilizados para promover a biodigestão anaeróbica da matéria orgânica, discutindo-se suas características e especificidades. A partir dessa contextualização, buscou-se destacar em termos quantitativos o biogás como fonte de energia. A partir da discussão sobre a composição dos gases no qual o biogás é constituído e destacando suas capacidades caloríficas, dispõe-se de informações que torna possível a compreensão de seu enorme potencial energético para uso.

Adentrando ao foco do trabalho, tratou-se de discutir aspectos teóricos e quantitativos que regem o princípio de aproveitamento energético do biogás, sendo eles os ciclos termodinâmicos de Brayton, Rankine, Combinado e Otto. Em seguida, buscou-se comparar as formas de aproveitamento em cada ciclo, destacando a eficiência das diferentes tecnologias comerciais com relação à conversão energética do biogás na geração de eletricidade. O trabalho encerra-se apresentando dados resultantes do estudo de diferentes autores que realizaram uma abordagem prática do uso de biogás a partir de estudo de casos. Buscou-se destacar na síntese realizada de cada um desses trabalhos a energia elétrica gerada a partir do biogás e as tecnologias que tem sido utilizada no processo de conversão.

3 FUNDAMENTOS TEÓRICOS E PRÁTICOS SOBRE BIOGÁS

3.1 Conceitos de Biogás

Castro (2018) define biogás como um combustível gasoso obtido a partir da compostagem de resíduos sólidos. Seu valor energético é alto e por ser composto por hidrocarbonetos, se assemelha ao gás natural, e por isso tem sido empregada na geração de energia, elétrica, térmica e mecânica. O autor explica também que a mistura gasosa que constitui o biogás pode ser produzida por meio da digestão anaeróbia, que é um processo fermentativo que possui algumas finalidades, entre elas, a remoção de matéria orgânica, a formação de biogás e a produção de biofertilizantes ricos em nutrientes.

Quanto à composição, de acordo com Pinheiro (2015) o biogás é tipicamente composto por aproximadamente metano, dióxido de carbono e um composto de hidrogênio, nitrogênio, amônia, ácido sulfídrico, monóxido de carbono, aminas voláteis e oxigênio. Os índices dessa composição estão diretamente ligados ao tipo de processo para obter o biogás e o biodigestor utilizado, além de variáveis como pressão e temperatura ao longo da fermentação. Na Tabela 1 pode ser observada a composição dos gases em dois diferentes tipos de processo.

Tabela 1 - Composição do Biogás

COMPONENTES	BIOGÁS DE ESTERCO	BIOGÁS DE ATERRO SANITÁRIO
METANO	60-70%	45-55%
DIÓXIDO DE CARBONO	30-40%	30-40%
NITROGÊNIO	<1%	5-15%
GÁS SULFÍDRICO	10-2000ppm	50-300ppm

Fonte: Pinheiro *et. al.* (2015)

A obtenção do biogás, segundo Castro (2018), pode se dar a partir de diferentes tipos de resíduos como esterco de animais, lodo de esgoto, lixo doméstico, resíduos agrícolas, efluentes industriais e plantas aquáticas. Conforme o tipo de resíduo utilizado o emprego da mistura gasosa também varia, podendo ser aproveitada como combustível ecológico já que reúne propriedades como alto poder

calorífico, produção de gases não tóxicos durante seu processo de queima, além de representar uma alternativa sustentável de gestão de resíduo sólido.

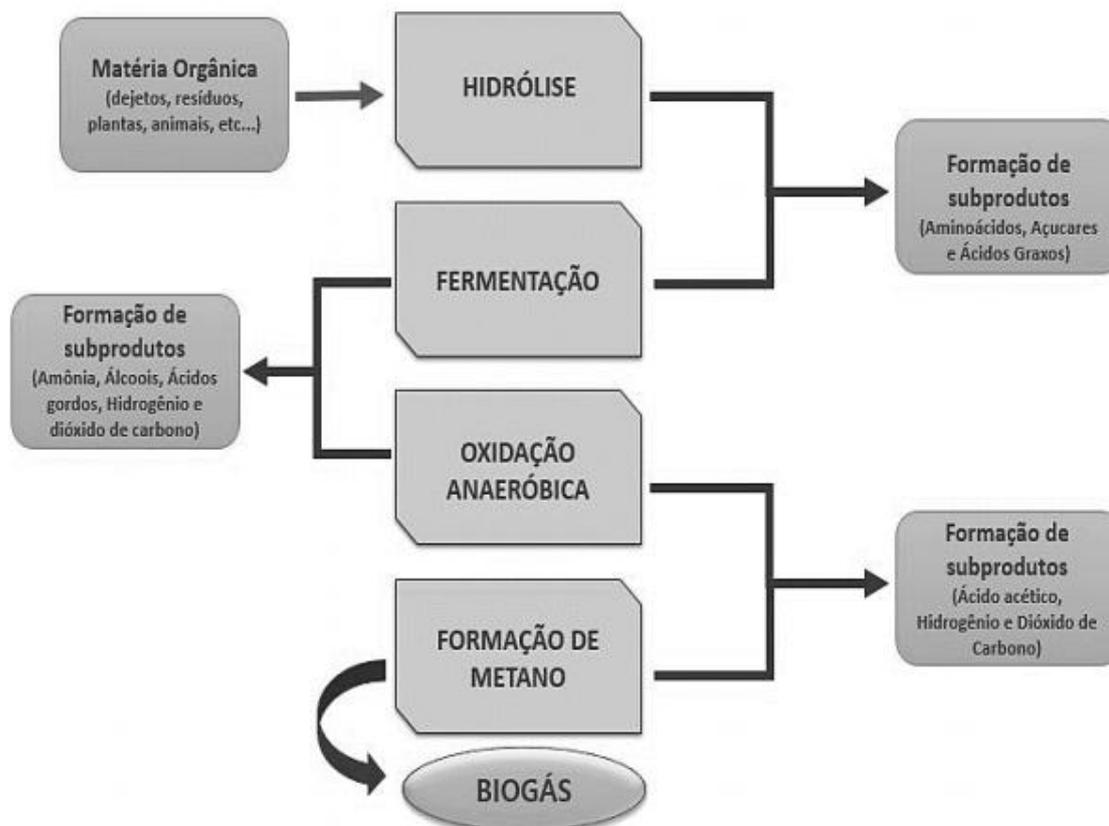
Para Souza, Pereira e Nogueira (2004), o biogás é uma fonte de energia alternativa que pode funcionar como fator contributivo na solução de questões ambientais como a redução de necessidade de espaços para a armazenagem de resíduos, podendo ser definido como uma alternativa verde para preço e a demanda dos combustíveis obtidos de fontes fósseis, e na redução dos impactos da obtenção de combustíveis como fontes poluidoras.

3.2 Processos de Obtenção do Biogás

No processo para obtenção do biogás, além de sua produção, o processo também gera como produto, o chamado “adubo verde”, um fertilizante que pode ser amplamente utilizado na agricultura, contribuindo para que o processo seja conhecido como altamente ecológico.

De forma geral para Araújo (2017), a produção do biogás ocorre através da digestão anaeróbica da matéria orgânica em quatro etapas, sendo elas a hidrólise, acidogênese, acetogênese e metanogênese, de processos bioquímicos envolvidos na produção do biogás.

Figura 1 - Etapas de produção do biogás



Fonte: Araújo (2017)

Segundo Karlsson (2014), as características e fenômenos envolvidos em cada etapa exemplificada na Figura 1 são:

- Na etapa de hidrólise, o material orgânico é quebrado em pequenas moléculas para que os microrganismos consigam se alimentar. Ligações moleculares mais complexas como carboidratos, gorduras e proteínas são quebradas por enzimas liberadas por um grupo específico de bactérias, produzindo aminoácidos, ácidos graxos e açúcares.
- Na fase de fermentação (ou fase de acidogênese), os componentes moleculares resultantes da hidrólise continuam a serem quebrados em moléculas sempre menores. Nessa, etapa são formados ácidos orgânicos (acético, butírico e láctico), álcoois, amoníaco e também hidrogênio e dióxido de carbono. Deve-se atentar para concentração de hidrogênio, pois, caso seja alta, poderá interferir na eficiência desse

processo, e por consequência gerar um acúmulo de ácidos orgânicos que reduz o pH da mistura e a eficiência.

- Durante a etapa de oxidação anaeróbica (ou fase de acetogênese), as bactérias acetogênicas transformam o material degradado das últimas duas etapas em ácido acético, hidrogênio e dióxido de carbono. As bactérias acetogênicas são sensíveis a grandes quantidades de hidrogênio, e para que haja uma boa interação entre os microrganismos produtores de metano é necessário que as bactérias metanogênicas da próxima etapa consumam o hidrogênio gerado.
- A etapa chamada de metanogênese é responsável pela conversão do ácido acético, hidrogênio e dióxido de carbono em metano e gás carbônico (biogás) devido à ação de microrganismos metanogênicos. Sabe-se que essa última etapa é mais importante devido à importância das bactérias terem cuidados especiais, por serem as responsáveis diretas da limitação da velocidade da cadeia de reações anteriores.

Ao final dessas etapas, além dos gases obtidos, tem-se também a matéria orgânica, resultado do processo de compostagem para a produção de adubos e biofertilizantes ecológicos e ricos em nutrientes.

Porém o biogás tem características de um gás agressivo no que se refere ao seu poder de corrosão, a sua manipulação demanda cuidados especiais com relação aos equipamentos utilizados na manipulação. Essa agressividade se dá, sobretudo, pela presença de traços de sulfeto de hidrogênio (ácido sulfídrico – H_2S) em sua composição (SOUZA; PEREIRA; NOGUEIRA, 2004).

Um biodigestor constitui-se, de uma câmara fechada, em que o resíduo é depositado em solução aquosa e, através da fermentação, isto é, da decomposição anaeróbia, o volume de resíduos sólidos tende ser reduzido. Segundo Pecora (2006), a empregabilidade da mistura gasosa a partir da digestão anaeróbia, também varia conforme o modelo do biodigestor – equipamento utilizado na fermentação do resíduo escolhido. Assim, o biogás obtido em um biodigestor desenhado para este fim, pode ser empregado como combustível para motores de diferentes máquinas.

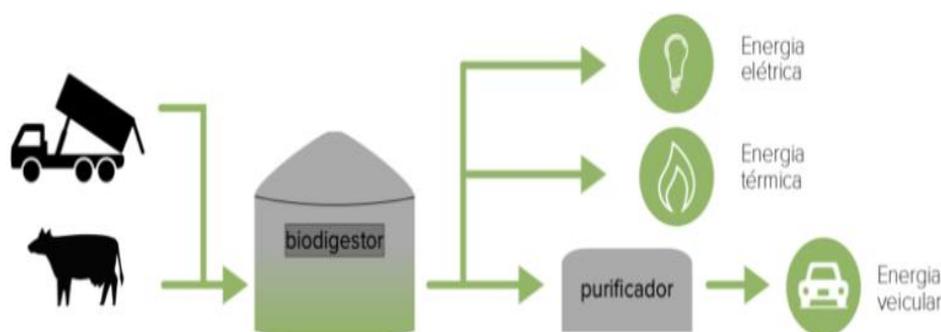
Posto isso, o tópico a seguir trata dos modelos de biodigestores e suas peculiaridades.

3.3 Modelos de Biodigestores

Biodigestores são compartimentos fechados e protegidos do contato com o ar atmosférico, permitindo que toda biomassa contida em seu interior passe pelas quatro etapas de biodigestão que foram apresentadas.

De acordo com Duarte (2018), existem diferentes tipos de biodigestores criados ao longo do tempo, cada um com sua peculiaridade. Os tipos de biodigestores se diferenciam em seus aspectos construtivos e possuem a mesma finalidade, aproveitar o gás de alto poder calorífico proveniente das matérias orgânicas. A Figura 2 demonstra um esquema básico dos biodigestores, que é o aproveitamento de resíduos sólidos para a geração de biogás.

Figura 2 – Esquema básico dos biodigestores



Fonte: Duarte (2018)

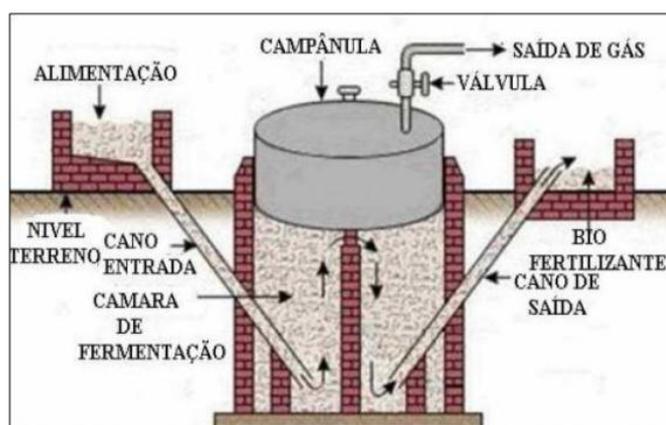
A seguir serão explicados três diferentes tipos de biodigestores, o indiano, o chinês e o biodigestor residencial estufa ou batelada.

3.3.1 Modelo Indiano

De acordo com Deganutti *et al.* (2002), este modelo é constituído basicamente por uma campânula de ferro ou fibra de vidro na qual o gás é armazenado à medida que a massa orgânica entra em processo de fermentação no biodigestor. Havendo uma quantidade adequada de biomassa em seu interior, esse processo de armazenamento permite que o biogás seja aproveitado de forma ininterrupta.

Na Figura 3 encontra-se exemplificado os principais aspectos construtivos do biodigestor de modelo Indiano. Duarte (2018) destaca que esse modelo tem como principal característica a campânula móvel, uma espécie de redoma, que pode estar submersa na biomassa em decomposição ou em um selo d'água externo. Essa campânula é a responsável pela manutenção da pressão interna do sistema, podendo se expandir quando o biogás produzido não for consumido. O modelo também possui uma parede central, que divide o tanque de fermentação em duas câmaras, possibilitando a movimentação do substrato por todo o biodigestor. Em suma, o modelo indiano não permite estocar o biogás, uma vez que a campânula é móvel.

Figura 3 – Esquema básico do biodigestor modelo Indiano



Fonte: Fonseca, Araújo e Hendges (2009)

Conforme Souza (2009), os componentes principais do biodigestor modelo Indiano exemplificado na Figura 3, bem como suas funções são:

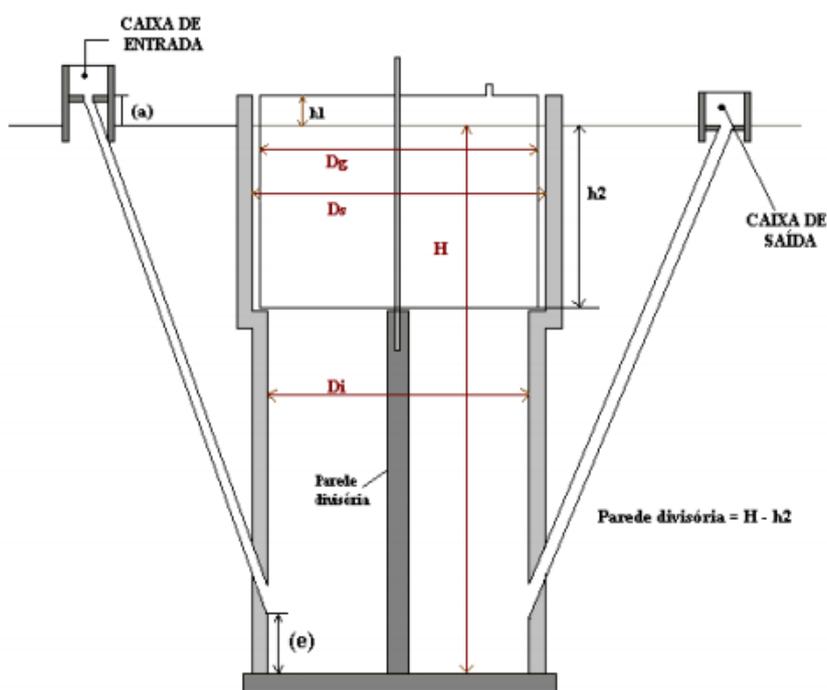
- caixa de entrada (ou caixa de carga): local onde são diluídos os dejetos;
- tubo de carga: transporta os dejetos da caixa de carga para o interior do biodigestor;
- câmara de biodigestão cilíndrica: local onde ocorre a fermentação anaeróbica para produção de biogás;
- gasômetro: local em que é armazenado o gás produzido. É formado por uma campânula que se movimenta verticalmente;

- tubo guia: guia o gasômetro quando ocorre sua movimentação vertical para cima e para baixo;
- tubo de descarga: responsável em transportar o material fermentado, seja líquido ou sólido, para a saída;
- caneleta de descarga: local destinado ao recebimento do material fermentado;
- saída de biogás: válvulas que permitem a saída do biogás.

Conforme Deganutti *et al.* (2002) expõe, os resíduos utilizados para alimentar o biodigestor não devem apresentar concentrações de sólidos totais maior que 8%, pois assim facilita-se a circulação dos resíduos pelo interior da câmara de fermentação, evitando também o entupimento dos canos de entrada e saída do material. Outra característica desse biodigestor é a necessidade do seu abastecimento contínuo e com determinada regularidade.

Na Figura 4 encontra-se ilustrado em corte um biodigestor modelo Indiano e as dimensões que devem ser consideradas durante a etapa de elaboração do projeto.

Figura 4 - Biodigestor tipo indiano em corte



Fonte: Deganutti *et al.* (2002)

Em que:

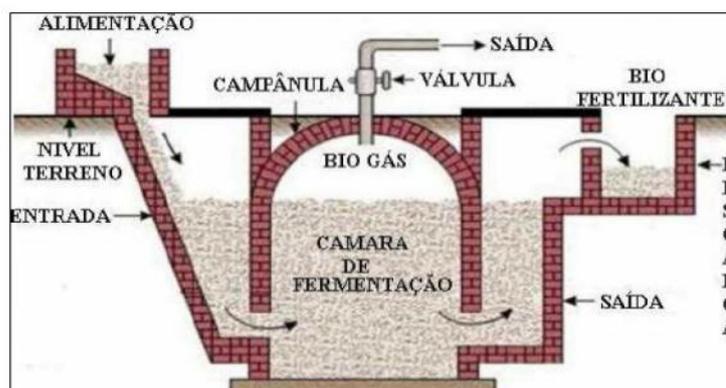
- H - é a altura do nível do substrato;
- Di - é o diâmetro interno do biodigestor;
- Dg - é o diâmetro do gasômetro;
- Ds - é o diâmetro interno da parede superior;
- h1 - é a altura ociosa (reservatório do biogás);
- h2 - é a altura útil do gasômetro.
- a - é a altura da caixa de entrada.

3.3.2 Modelo Chinês

Este modelo, de acordo Deganutti *et all.* (2002), consiste em câmara cilíndrica de alvenaria como um teto em forma de uma abóboda impermeável, destinado para armazenagem do biogás. Esse modelo pode ser chamado de reator e seu modo de funcionamento se baseia nas diferenças de pressão em seu interior, similar ao princípio de uma prensa hidráulica. O acúmulo de biogás provoca deslocamentos do efluente da câmara de fermentação para a caixa de saída, ou em sentido contrário quando ocorre a descompressão (BENINCASA *et al.*, 1990).

Na Figura 5 encontra-se exemplificado os principais aspectos construtivos do biodigestor Chinês. Segundo Duarte (2018), esse modelo foi inspirado no modelo Indiano, no entanto, com algumas modificações para torná-lo mais viável economicamente. Conforme se verifica na figura, o sistema não possui uma campânula de metal, e é construído quase totalmente em alvenaria com teto impermeável, possibilitando o armazenamento do biogás.

Figura 5 - Esquema básico do biodigestor modelo Chinês

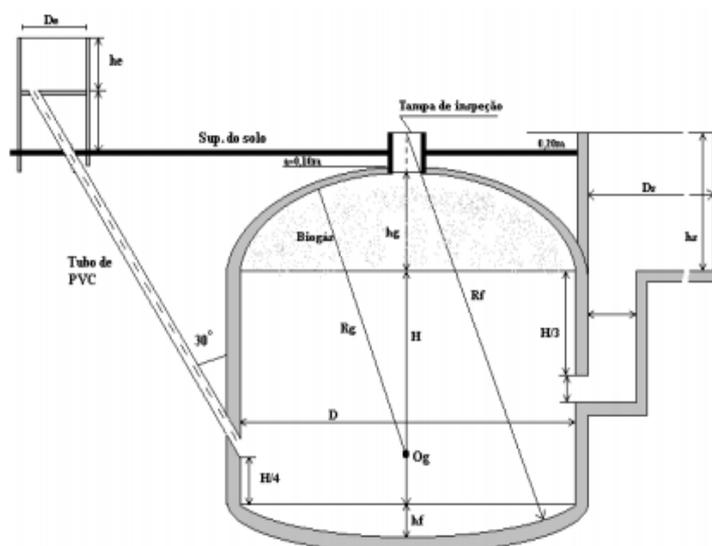


Fonte: Fonseca, Araújo e Hendges (2009)

Neste tipo de biodigestor; uma parcela de gás contido na caixa de saída é liberada para a atmosfera, reduzindo parcialmente a pressão interna de gás. Em função disso, tais modelos não são utilizados em instalações de grande porte (DEGANUTTI *et. all.*, 2002). Ainda segundo o autor, o substrato deve ser fornecido continuamente e com concentração de sólidos totais menores que 8%, similar ao modelo Indiano.

Na Figura 6 encontra-se ilustrado em corte um biodigestor modelo Chinês e as dimensões que devem ser consideradas durante a etapa de elaboração do projeto.

Figura 6 – Biodigestor tipo Chinês em corte



Fonte: Deganutti *et all.* (2002)

Em que:

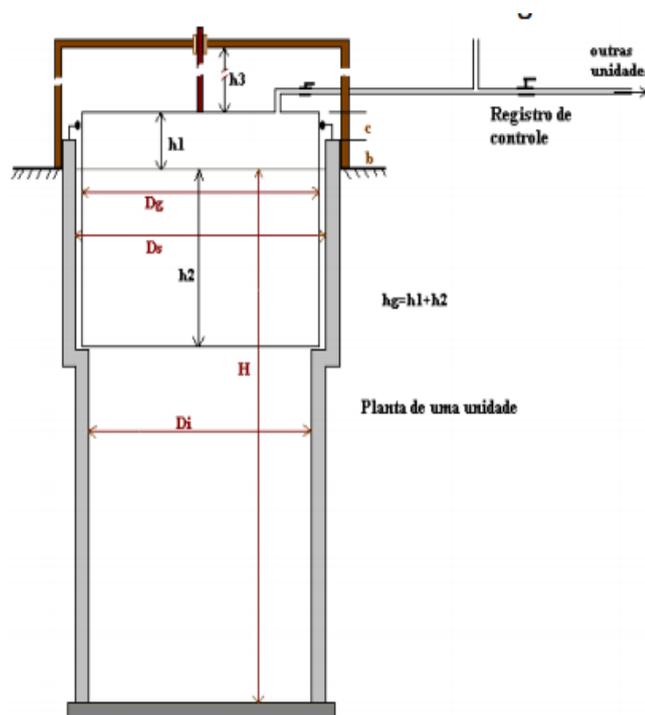
- D – é o diâmetro do corpo cilíndrico;
- H – é a altura do corpo cilíndrico;
- Hg – é a altura da calota do gasômetro
- hf – é a altura da calota do fundo
- Of – é o centro da calota esférica do fundo;
- Og – é o centro da calota esférica do gasômetro;
- he – é a altura da caixa de entrada;
- De – é o diâmetro da caixa de entrada;
- hs – é a altura da caixa de saída;
- Ds – é o diâmetro da caixa de saída;
- a – é o afundamento do gasômetro;

3.3.3 Modelo Residencial Estufa ou Batelada

O modelo em batelada, segundo Deganutti *et al.* (2002) pode ser utilizado em diferentes propriedades rurais ou urbanas, por ser compacto eficiente e de baixo custo. O biodigestor residencial pode ser abastecido com resto de alimentos, grama, fezes de animais domésticos, galinhas, porcos e biomassa em geral. Dependendo da sua capacidade ele pode produzir equivalente a um botijão de gás de cozinha.

Na Figura 7 encontra-se ilustrado a visão em corte do biodigestor residencial e as dimensões que devem ser adotadas em sua construção. Diferentemente dos modelos contínuos apresentados anteriormente, pode-se observar nessa figura que não há uma entrada e saída de material durante o processo de obtenção do biogás. Duarte (2018) reitera que este tipo de biodigestor opera de forma descontínua, e a alimentação do sistema com matéria orgânica ocorre uma vez a cada ciclo. O sistema é fechado hermeticamente por um período de 40 a 60 dias. Após este tempo, quase a toda a matéria orgânica já se decompôs, diminuindo a produção de biogás.

Figura 7 – Biodigestor tipo Residencial Estufa em corte



Fonte: Deganutti *et al.* (2002)

Em que:

- D_i é o diâmetro interno do biodigestor;
- D_s é o diâmetro interno da parede superior;
- D_g é o diâmetro do gasômetro
- H é a altura do nível do substrato;
- h_1 é a altura ociosa do gasômetro;
- h_2 é a altura útil do gasômetro;
- h_3 é a altura útil para deslocamento do gasômetro;
- b é a altura da parede do biodigestor acima do nível do substrato;
- c é a altura do gasômetro acima da parede do biodigestor.

Na obtenção do biogás, seu princípio de funcionamento baseia-se em uma estufa na qual é depositado todo material orgânico e à medida que o material vai entrando em decomposição essa câmara tende a se expandir com a pressão dos gases. Assim, o gás tende a sair por uma tubulação na parte superior da estufa.

3.4 Biogás Como Combustível

O biogás é um bicomcombustível gasoso, inflamável, de alto valor energético e semelhante ao gás natural. Conforme Salomon (2007), sua composição é formada em grande parte por metano (CH_4) e o restante é composto por dióxido de carbono (CO_2) e outros gases, conforme exposto na Tabela 2. A porcentagem de cada gás relaciona-se de acordo com os processos de biodigestão como também das características dos resíduos orgânicos utilizados. A quantidade de biogás produto da biodigestão corresponde de 2,0 a 4,0% do peso da matéria orgânica utilizada no Processo (SALOMON, 2007).

Tabela 2 - Composição média do biogás proveniente de diferentes resíduos orgânicos

GASES	PORCENTAGEM %
METANO (CH_4)	40 - 75
DIÓXIDO DE CARBONO (CO_2)	25 - 40
NITROGÊNIO (N)	0,5 - 2,5
OXIGÊNIO (O)	0,1 - 1
ÁCIDO SULFÍDRICO (H_2S)	0,1 - 0,5
AMÔNIA (NH_3)	0,1 - 0,5
MONÓXIDO DE CARBONO (CO)	0 - 0,1
HIDROGÊNIO (H)	1 - 3

Fonte: Salomon (2007)

Quando o objetivo é utilizar o biogás como combustível, o principal componente a ser obtido é o gás metano. Conforme Alves (2000), a presença de algumas substâncias não combustíveis (dióxido de carbono, água) prejudica o processo de queima, o que torna a conversão energética menos eficiente. Durante a combustão, tais substâncias absorvem parte da energia gerada, fazendo reduzir o Poder Calorífico do Biogás (PCI). Esse indicador é utilizado para determinar o potencial teórico de energia contido nos combustíveis.

Segundo Antônio (2016), quando purificado (sem outras substâncias químicas além do metano), o biogás tem um PCI, nas condições normais de temperatura e pressão, de cerca de $36,0 \text{ MJ/m}^3$. Já o biogás com concentração de metano entre 50 a 80% tem um PCI entre $17,8$ e $25,5 \text{ MJ/m}^3$. Verifica-se que o biometano (oriundo do

tratamento do biogás) pode chegar a 72% do poder calorífico do gás natural que é atualmente um combustível amplamente utilizado.

Se tratando de um combustível, o biogás pode ser comparado a outras fontes comumente utilizadas. Na Tabela 3 é mostrado a equivalência energética, levantada por alguns autores, de 1 m³ de biogás com outros combustíveis. Dada a relação direta de equivalência entre os combustíveis, verifica-se que o biogás é uma alternativa viável na promoção da diversificação das fontes energéticas, principalmente na redução da utilização dos combustíveis fósseis por uma fonte mais limpa de energia (CASARIN, 2016).

Tabela 3 - PCI de diferentes gases

ENERGÉTICO	FERRAZ & MARIEL (1980)	SGANZERLA (1983)	NOGUEIRA (1986)	SANTOS (2000)
GASOLINA (L)	0,61	0,613	0,61	0,6
QUEROSENE (L)	0,58	0,579	0,62	-
DIESEL (L)	0,55	0,553	0,55	0,6
GLP (KG)	0,45	0,454	1,43	-
ÁLCOOL (L)	-	0,79	0,8	-
CARVÃO M. (KG)	-	0,735	0,74	-
LENHA (KG)	-	1,538	3,5	1,6
ELETRICIDADE (KWH)	1,43	1,428	-	6,5

Fonte: Casarin (2016)

Em relação à capacidade de produção do biogás, na Tabela 4, é possível verificar uma estimativa do valor produzido a partir do dejetos de alguns animais.

Tabela 4 - Estimativa da capacidade de produção do biogás com relação a alguns dejetos de animais

DEJETOS	PRODUÇÃO DIÁRIA	PRODUÇÃO DE BIOGAS
BOVINOS	15 kg/animal	270 m ³ por tonelada
SUÍNOS	2.25 kg/animal	560 m ³ por tonelada
EQUINOS	10 kg/animal	260 m ³ por tonelada
OVINOS	2.80 kg/animal	250 m ³ por tonelada
AVES	0,18 kg/animal	285 m ³ por tonelada

Fonte: Barreira (2011)

Conforme Albarracin (2016), os potenciais técnicos para o aproveitamento energético de resíduos da biomassa são grandes para o cenário brasileiro. Na Tabela 5 é mostrado o potencial de geração de biogás e eletricidade nas centrais de conversão energética a partir de alguns resíduos que são produzidos no país. Ainda segundo o autor, se todos eles fossem aproveitados para gerar eletricidade via biogás, a contribuição na oferta interna de energia elétrica seria de aproximadamente 70% dos 590,5 TWh gerados em centrais de serviço público e autoprodutores em 2014 no Brasil.

Tabela 5 - Potencial para a produção de biogás e eletricidade utilizando diversos tipos de resíduos no Brasil

SETOR	TIPO DE RESÍDUO	POTENCIAL DE GERAÇÃO DE BIOGÁS (M³/ ANO)	POTENCIAL ENERGÉTICO (GWH/ANO)
RESÍDUOS DA PECUÁRIA	Aves	2.825.206.704,60	4.040,05
	Suínos	2.628.897.610,30	3.759,32
	Vaca ordenhada	3.953.560.106,63	5.653,59
RESÍDUOS AGROINDUSTRIAIS	Açúcar e álcool (vinhoto)	3.170.179.374,00	4.533,40
	Cervejas	267.271.219.337,79	382.197,84
	Papel e celulose (licor negro)	3.578.833.530,00	5.117,73
RESÍDUOS URBANOS	Resíduos sólidos urbanos	5.910.989.797,80	8.452,72
	Esgoto	357.126.518	510,69
TOTAL		289.696.013.015,12	414.265,34

Fonte: Albarracin (2016)

Na seção seguinte, serão apresentados alguns fatores que interferem diretamente na produção do biogás.

3.4.1 Fatores de Interferência na Produção do Biogás

Conforme Santos (2015), a eficiência no processo de geração do biogás, a partir da biodigestão anaeróbica da matéria orgânica, está diretamente relacionada às condições nas quais as bactérias metanogênicas estão submetidas. Em condições ótimas, os metanogênicos regulam e neutralizam o pH do digestor por meio da conversão dos ácidos graxos voláteis em CH₄ e outros gases.

De forma geral, a capacidade de produção do biogás em um biodigestor dependerá de diversos fatores como: umidade, temperatura, pH, alcalinidade, composição do resíduo, dentre outros. A seguir serão apresentadas as descrições de alguns desses fatores (SANTOS, 2015; PECORA, 2006; SALOMON, 2007).

- a) Temperatura – A dinâmica enzimática das bactérias relaciona-se estritamente com a temperatura. Alterações bruscas na temperatura causam desequilíbrio nas culturas envolvidas na produção do biogás, principalmente nas bactérias que formam o metano. O gás metano pode ser gerado em ambiente mesofílico (25-45 C^o) e termofílico (50-65 C^o). Não é recomendado operar o biodigestor abaixo de 10 C^o, devido à baixa produção de biogás e nem acima de 65 C^o, para que as enzimas sejam destruídas pelo calor. Caso o biodigestor opere acima de 35 C^o, é necessário um aporte energético extra, o que pode inviabilizar economicamente sua operação. Logo, costuma utilizar-se a escala mesofílica.
- b) Umidade – A umidade em um sistema de geração de biogás depende da umidade inicial do resíduo, da água produzida na biodigestão e da infiltração de água na superfície e no solo. Quanto maior o nível de umidade, maior será a taxa de produção do biogás. O teor de água dentro do biodigestor varia de 60 a 90% do peso total do conteúdo.
- c) Impermeabilidade do Ar – As bactérias metanogênicas são anaeróbicas, de forma que a decomposição da matéria orgânica na presença do oxigênio irá resultar apenas na formação de dióxido de carbono (CO₂).

- d) Composição do Resíduo – o potencial de produção do biogás aumenta de acordo com a porcentagem de matéria orgânica do qual o resíduo é composto. Resíduos provenientes de esterco são exemplo de matéria que pode ser facilmente decomposta, enquanto materiais que se decompõem lentamente, como pedaços de madeira, não contribuem significativamente na produção do biogás. Os principais nutrientes (substratos) dos microrganismos, são: carbono, nitrogênio e sais orgânicos. Deve-se manter uma relação de C/N (CARBONO SOBRE NITROGENIO) entre 20:1 e 30:1, visto que as bactérias utilizam Carbono de 25 a 30 vezes mais rápido utilizam o Nitrogênio. Em proporções baixas, o meio pode se tornar tóxico pela formação de Amônia e em níveis altos o carbono reduz a atividade das bactérias já que não conseguem absorvê-lo por completo.
- e) pH – Durante a digestão anaeróbica verificam-se duas fases sucessivas. A primeira é caracterizada pela diminuição do pH em valores próximos de 5,0 devido a ação das bactérias acidogênicas, as quais liberam ácidos graxos voláteis. A segunda fase se caracteriza pelo aumento do pH, estabilizando-se próximo da neutralidade (pH~7). Nela, as bactérias metanogênicas se reproduzem progressivamente e induzem a elevação do pH por meio da catálise do ácido acético. Uma acidez excessiva pode ocorrer pela presença de grande quantidade de ácidos graxos ou materiais tóxicos no digester devido ao acúmulo de carga orgânica. Para se estabilizar o pH pode-se interromper o abastecimento de matéria orgânica até que as bactérias metanogênicas consuma as substâncias em excesso ou então é possível também a utilização de substâncias básicas para neutralizar o meio.

Além dos fatores mencionados, existem ainda outros que podem influenciar a taxa de geração do biogás. Pode-se citar a alcalinidade, tamanho das partículas, compactação dos resíduos, dimensões do biodigestor (área e profundidade) bem como o modo na qual é operado e o tipo de biodigestor utilizado.

3.4.2 A Purificação do Biogás

A utilização final do biogás requer um processo de limpeza e purificação. Conforme Salomon (2007), algumas substâncias presentes no biogás gerado pela biodegradação da matéria orgânica prejudicam o processo de queima e consequentemente a eficiência da conversão energética. Além disso, a presença de gás sulfídrico (H_2S) pode, por meio da corrosão, diminuir o rendimento e a vida útil do motor térmico utilizado. De acordo com Silva (2009), o processo de purificação e limpeza do biogás além de potencializar seu poder calorífico e reduzir os danos aos equipamentos por meio da corrosão, busca reduzir também as emissões de CO_2 para a atmosfera.

As etapas de purificação do biogás são: a secagem, separação do Dióxido de Carbono e retirada dos diversos tipos de resíduos. Conforme a aplicação e a necessidade, é possível se obter um biogás livre de CO_2 e de impurezas, resultando em um poder calorífico próximo ao gás natural (SILVA, 2009).

Conforme Salomon (2007), a remoção de umidade pode ser feita utilizando glicóis, sílica gel e outros dessecantes e o nível de remoção final dependerá da aplicação desejada e do seu grau de umidade aceitável. Já na remoção do CO_2 presente no biogás, pode-se utilizar processos presentes nas indústrias petroquímicas e que são utilizados na purificação do gás natural. Alguns deles são: a absorção física e química; separação por membranas; separação por reações químicas; adsorção em superfície contínua e separação criogênica. Ainda segundo o autor, na remoção do H_2S utilizam-se os métodos que se enquadram em duas categorias, o processo seco de oxidação e processos de oxidação na fase líquida.

3.4.3 Combustão do Biogás

Conforme De Souza (2016) destaca, o volume de metano requer dois volumes de oxigênio e após a combustão é formado um volume de dióxido de carbono e dois volumes de vapor de água. Para uma composição de 58% de metano presente no biogás e 21% de oxigênio no ar, 1,72 volumes de biogás requerem 9,52 volumes de ar ou então 1,0 volume de biogás para 5,53 de ar. Dessa forma, na combustão completa a razão estequiométrica é de 15,3% de biogás no ar. Ainda segundo o autor, quando a mistura for pobre em biogás e ao mesmo tempo

apresentar excesso de ar, a mistura é chamada de pobre e em casos onde há excesso de biogás em relação ao ar a mistura é rica.

Na determinação do tipo de mistura, utiliza-se a Equação 1 denominada de fator lambda (λ), relacionando a mistura ar combustível real (A/C_{real}) e a mistura ar combustível estequiométrica.

$$\lambda = \frac{A/C_{real}}{A/C_{estequiométrica}} \quad (1)$$

Onde:

$\lambda < 1$: mistura rica (deficiência de ar);

$\lambda > 1$: mistura pobre (excesso de ar);

$\lambda = 1$: mistura estequiométrica.

Conforme De Souza (2016), em motores de combustão interna encontra-se presente a denominada sonda lambda, cuja funcionalidade é manter a mistura perto da faixa estequiométrica de forma a evitar o aumento do consumo de combustível (mistura rica) ou a perda de potência no motor (mistura pobre).

3.5 Características de Manejo e Dimensionamento do Biodigestor

Para garantir uma geração de biogás contínua e uniforme, deve-se atentar às condições de alimentação do biodigestor, ou seja, do manejo dos resíduos que serão ali depositados. Conforme Kunz (2013), caso o manejo não seja corretamente executado o desempenho do processo pode ser comprometido. Além disso, Herculano (2016) apresenta também cuidados a serem tomados com a instalação física da qual o biodigestor faz parte. Mais noções sobre o manejo dos substratos e da infraestrutura podem ser encontradas em Probiogás (2015).

A primeira etapa em um projeto consiste em determinar qual a melhor tecnologia a ser utilizada com base na análise do tipo de resíduo que será utilizado pelo sistema. Outros fatores também devem ser levados em consideração, como o tipo de alimentação (contínua, batelada, dentre outros), a temperatura de operação, teor de água, cuidados com a sobrecarga, tempo de retenção, número de fases

presentes no processo, dentre outros (HERCULANO, 2016). Em relação ao tipo de alimentação do biodigestor, Kunz (2013) expõe:

- Biodigestores em batelada: operam em ciclos de alimentação, biodigestão e descarte. São mais utilizados quando há uma produção elevada de sólidos em um curto espaço de tempo. Ex: Dejetos das granjas de avicultura.
- Biodigestores contínuos: operam com alimentação periódica de dejetos. Ressalta-se a necessidade de se evitar grandes variações de energia.

Após a definição do modelo do biodigestor a ser implementado, Herculano (2016) aponta a necessidade do cálculo da quantidade de rejeito, vazão e composição química para elaboração de um plano técnico de manejo e adubação e a quantidade de energia que se pode produzir de acordo com o volume disponível de dejetos na propriedade.

Dentre as diferentes variáveis que impactam no funcionamento do biodigestor e na sua capacidade de gerar biogás, na subseção a seguir explicita-se duas delas conforme apresentado por Kunz (2013).

3.5.1 Carga Orgânica Volumétrica (COV)

A partir do cálculo desse parâmetro obtêm-se a quantidade de matéria orgânica que pode ser utilizada no biodigestor em determinada unidade de tempo e conforme o volume do biodigestor. Nesse cálculo, são escolhidos os sólidos voláteis (kg de SV) como parâmetro por estarem associados à fração biodegradável que produzirá o biogás. O valor da COV é calculado conforme a Equação 2 (KUNZ, 2013).

$$COV = \frac{(C \times Q)}{V} \quad (2)$$

Onde:

COV: Carga Orgânica volumétrica (kg SV/ m³. dia);

C: concentração (kg SV / m³)

Q: vazão (m³ / dia)

V: volume (m³)

Para resíduos animais em biodigestores de baixa carga, a carga de sólidos voláteis varia entre 0,5 a 1,5 (kg SV / m³. dia) e para biodigestores de alta carga, ou seja, aqueles que operam em condições termofílicas, esse valor varia de 1,5 a 3,5 (kg SV / m³. dia).

3.5.2 Tempo de Retenção Hidráulica (TRH)

Esse indicador representa o tempo em que a matéria orgânica permanece confinada no interior do biodigestor. Ele é obtido em função do volume e da vazão de alimentação do biodigestor, conforme mostra a Equação 3 (KUNZ, 2013).

$$TRH = \frac{V}{Q} \quad (3)$$

Onde:

TRH – Tempo de retenção hidráulica (dia);

V – Volume (m³);

Q – Vazão (m³/dia).

Conforme Kunz (2013) aponta, o método de dimensionamento pelo parâmetro TRH pode levar a um sub ou superdimensionamento por não considerar a concentração do efluente. Contudo, o TRH é amplamente utilizado devido a sua forma prática na qual não requer análises laboratoriais para o cálculo do volume. Em biodigestores de baixa carga o valor do TRH encontra-se entre 20 a 40 dias e em biodigestores de alta carga pode variar de 10 a 20 dias.

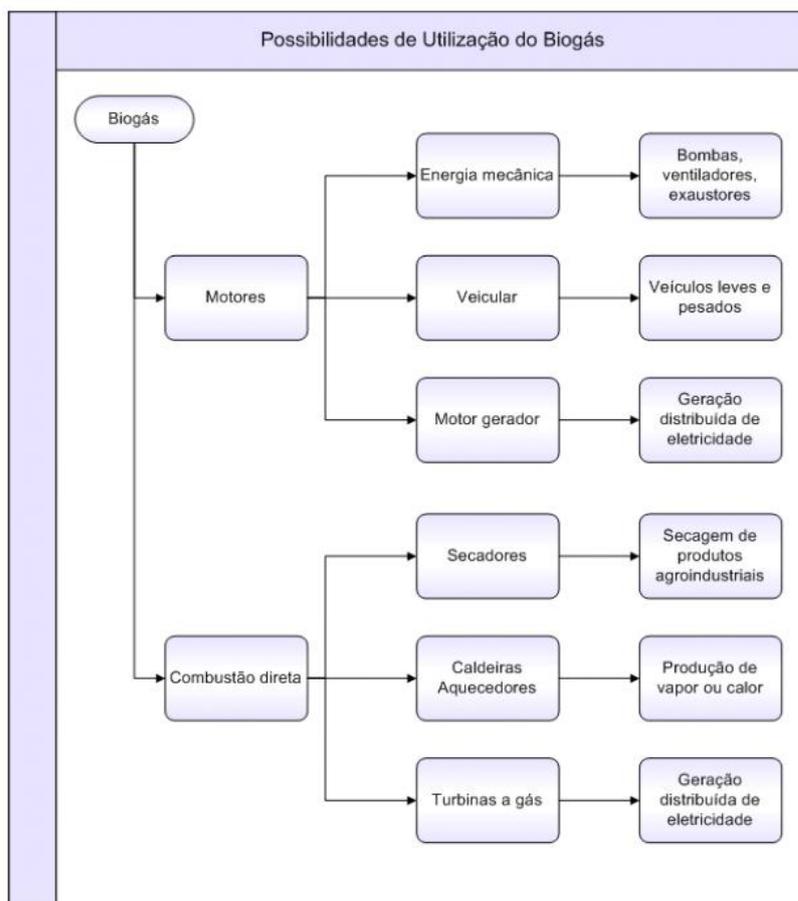
4 PRINCÍPIOS E TECNOLOGIAS DE APROVEITAMENTO ENERGÉTICO DO BIOGÁS NA GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA

Durante a etapa de geração do biogás apresentada no capítulo anterior abordou-se os diferentes tipos de biodigestores e os vários fatores químicos que influenciam diretamente em sua produção. Nesse capítulo serão tratadas das diferentes formas, tecnologias e princípios físico-técnicos envolvidos na conversão energética do biogás.

A energia química contida nas moléculas do biogás pode ser convertida em energia mecânica em um processo de combustão controlada (controle das proporções entre ar e combustível), que por sua vez pode ser transformada em energia elétrica por meio de alternadores. Costa (2006) menciona que é possível também realizar a queima direta do biogás em caldeiras para cogeração ou energia térmica, mas as turbinas a gás e os motores de combustão interna do tipo ciclo Otto são as tecnologias mais utilizadas atualmente.

Na Figura 8 encontra-se ilustrado um fluxograma que apresenta as possibilidades da utilização do biogás como combustível alternativo a outras fontes energéticas.

Figura 8 - Fluxograma para as possibilidades de utilização do biogás



Fonte: De Souza (2016)

Conforme De Souza (2016) destaca, em um projeto de geração distribuída que utiliza o biogás como combustível em motores geradores, é importante que se conheça a teoria e os parâmetros de desempenho de motores de combustão a biogás, a conversão de motores de ignição por centelha a biogás, os motores geradores de eletricidade a biogás, bem como a forma de dimensioná-los e os detalhes da instalação elétrica.

Nos tópicos seguintes, serão apresentados os conceitos básicos da operação de cada um desses métodos de conversão energética do biogás, cuja base está nos ciclos termodinâmicos. Posteriormente, serão relacionadas as características ao princípio empregado nas principais tecnologias utilizadas na geração distribuída de eletricidade.

4.1 Máquinas Térmicas

De acordo com Medina e Nisenbaum (2009), dentre as várias possibilidades de transformações de energia, a que mais fascinava os cientistas em meados do século XIX, era a possibilidade de converter calor em movimento através das Máquinas Térmicas. A base do funcionamento das máquinas térmicas é simples: quando se aquece um gás, ele expande. Diversos cientistas, ao longo dos séculos, observaram essas transformações e efetuaram medições das quantidades de energia envolvidas nelas. Até hoje, em todos os experimentos realizados, sempre a energia se conservou. O princípio da conservação da energia é um dos mais sólidos da ciência e é apresentado na Termodinâmica por meio da Primeira Lei da Termodinâmica.

De acordo com Çengel e Boles (2013), frequentemente o termo máquina térmica é usado em um sentido amplo, incluindo dispositivo que produz trabalho e não operar em ciclo termodinâmicos. Incluem-se nessa categoria as máquinas que envolvem combustão interna, que operam em um ciclo mecânico, mas não em um ciclo termodinâmico, pois o fluido de trabalho não passa por um ciclo completo.

4.2 Ciclos Termodinâmicos e Tecnologias para Conversão de Energia

Logo depois de um fluido passar por uma série de circuitos e processos termodinâmicos e voltar para seu estado inicial, diz-se que foi realizado um ciclo termodinâmico. Através destes ciclos, pode se obter as estimativas de eficiência na conversão energética (BORGNAKKE; SONNTAG, 2019).

Os ciclos termodinâmicos podem ser classificados em duas categorias de acordo com Çengel e Boles (2013), são elas: ciclos de potência e ciclo de refrigeração. Os dispositivos ou sistemas utilizados para produzir potência são geralmente chamados de motores (ou máquinas), e os ciclos termodinâmicos nos quais eles operam são chamados de ciclos de potência. Os dispositivos ou sistemas utilizados para produzir um efeito de refrigeração são chamados de refrigeradores, condicionadores de ar ou bombas de calor.

Ainda segundo Çengel e Boles (2013), os ciclos termodinâmicos também podem ser classificados quanto à fase do fluido de trabalho em outras duas

categorias: Ciclo a gás e ciclos a vapor. Os ciclos termodinâmicos ainda podem ser classificados como ciclos abertos, fechados e combinados.

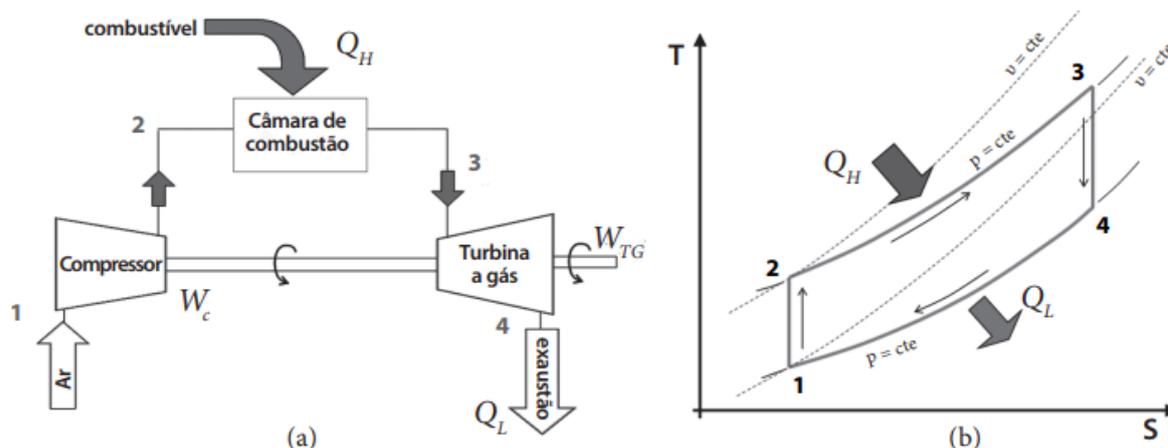
A seguir serão apresentados os principais tipos de ciclos de uma máquina térmica, permitindo a compreensão dos mecanismos de conversão energética do biogás em outras formas de energia.

4.2.1 Turbinas de Ciclo Brayton

O ciclo de Brayton ideal consiste em um modelo termodinâmico que é aplicado na análise aproximada dos processos térmicos que ocorrem nas turbinas a gás. Sua principal característica baseia-se na adição de calor ao sistema mantendo-se a pressão constante (WANKE, 2019).

As turbinas a gás que realizam o ciclo de Brayton são compostas basicamente por um compressor de ar, uma câmara de combustão e uma turbina de expansão. Compressor e turbina de expansão são acoplados a um mesmo eixo que também é acoplado ao gerador elétrico, conforme ilustrado na Figura 9.

Figura 9 - Ciclo Brayton e diagrama T-s



Fonte: Uberti e Indrusiak (2015)

Entre os pontos 1 e 2 da figura, o ar atmosférico é succionado pelo compressor, sendo comprimido em alta pressão. Posteriormente, o ar comprimido é dirigido à câmara de combustão onde é misturado ao combustível. Nessa combustão geram-se gases de elevada temperatura, podendo superar 1000 °C, sob pressão constante de dois a três atm. Em seguida, entre os pontos 3 e 4 o gás

proveniente da combustão é expandido na turbina produzindo trabalho para acioná-la como também para acionar o compressor. Após a expansão, a temperatura cai, mas ainda é bastante elevada, da ordem de 550 °C. Os gases de exaustão proveniente das turbinas podem ser jogados diretamente na atmosfera, representando assim um ciclo aberto que possui menor eficiência, ou então esse calor ser aproveitado para evaporar água ou algum outro fluido em um ciclo combinado que será posteriormente descrito (WANKE, 2019; PECORA 2006).

O processo termodinâmico pode ser compreendido a partir do diagrama T-s (temperatura versus entropia) da Figura 9. Entre os pontos 1 e 2, devido a compressão adiabática (sem troca de calor com o meio externo) e isentrópica (entropia constante) do ar ocorre um aumento em sua temperatura. Entre 2 e 3 ocorre a queima do ar e combustível a uma pressão constante, aumentando-se assim a temperatura e entropia dos gases. Entre os pontos 3 e 4, à medida que o fluido fornece trabalho à turbina, ocorre a expansão isentrópica e sua pressão e temperatura são reduzidos. Entre os pontos 4 e 1 ocorre a rejeição de calor para o meio externo a pressão constante.

Em termos da eficiência, o ciclo de Brayton pode ser analisado a partir da Equação 4 através do balanço de energia por unidade de massa, conforme Uberti e Indrusiak (2015) apresentam.

$$W_{TG} = Q_H - Q_L - W_C \quad (4)$$

Em que Q_H e Q_L são, respectivamente, os calores fornecido e rejeitado pelo sistema, W_{TG} e W_C são os trabalhos gerados pela turbina de expansão e o trabalho consumido pelo compressor respectivamente. Todas as grandezas são referidas a unidade de massa e são dadas em $\frac{kJ}{kg}$. Portanto, verifica-se que o trabalho líquido depende diretamente três fatores que podem ser controlados para que a eficiência termodinâmica seja aumentada. Esse trabalho líquido pode ser compreendido também pela área interna do diagrama T-s Figura 9. Segundo Uberti e Indrusiak (2015), esse ciclo possui eficiência termodinâmica da ordem de 30 a 40%. As equações de análise desse ciclo são apresentadas na subseção seguinte.

De acordo com Jovani Jr. e Kojiro (2007) o ciclo Brayton tem uma representação simplificada dos processos que ocorrem nas máquinas térmicas da

turbina a gás quando abordado o ciclo padrão a ar. Os processos de descompressão e expansão foram assumidos adiabáticos e reversíveis, ou simplesmente processos isentrópicos. Outra suposição é que no trocador de calor, onde ocorre o abastecimento de energia ao ar, não há perda de pressão. Por fim, assume-se que a pressão de saída da turbina é a mesma da entrada do compressor.

4.2.1.1 Equações analíticas do Ciclo Ideal de Brayton

Conforme tratado por Borgnakke *et al.* (2019), a análise do ciclo ideal de Brayton pode ser feita pelas equações apresentadas a seguir.

O processo isentrópico é analisado pelas Equações 5 e 6 a seguir:

$$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{\frac{k-1}{k}} \quad (5)$$

$$\frac{T_4}{T_3} = \left(\frac{P_4}{P_3}\right)^{\frac{k-1}{k}} = \left(\frac{P_1}{P_2}\right)^{\frac{k-1}{k}} \quad (6)$$

Em que P_i e T_i ($i = [1\ 4]$) representam, respectivamente, a pressão e a temperatura em cada ponto ilustrado na Figura 9. A constante k presente nas Equações 5 e 6 é a razão dos calores específicos e é obtida a partir da Equação (7) a seguir

$$k = \frac{C_p}{C_v} \quad (7)$$

Em que C_p é a capacidade térmica a pressão constante e C_v a capacidade térmica a volume constante. A razão entre as pressões pode ser expressa por:

$$r_p = \frac{P_2}{P_1} \quad (8)$$

Combinando as Equações 5 e 6 com a Equação 8 tem-se a seguinte equação:

$$\frac{T_2}{T_1} = \frac{T_3}{T_4} = r_p^{\frac{k-1}{k}} \quad (9)$$

Ainda conforme Borgnakke *et al.* (2019) trata, a eficiência energética η_t desse ciclo é calculada a partir da Equação 10 conforme:

$$\eta_t = 1 - \frac{T_1}{T_2} = 1 - \frac{1}{r_p^{\frac{k-1}{k}}} \quad (10)$$

Conforme se verifica na Equação 10, a eficiência térmica de um Ciclo Brayton aumenta com a razão das pressões. A energia térmica que é absorvida pela câmara de combustão é calculada pela Equação 11 conforme:

$$Q_H = m \times C_p \times (T_3 - T_2) \quad (11)$$

Para energia térmica Q_L rejeitada pela turbina, seu valor é obtido pela Equação 12 a seguir

$$Q_L = m \times C_p \times (T_4 - T_1) \quad (12)$$

Finalmente, o trabalho líquido do Ciclo de Brayton ideal é calculado conforme a Equação 13.

$$Q_H - Q_L = m \times C_p \times [(T_3 - T_2) \times (T_4 - T_1)] \quad (13)$$

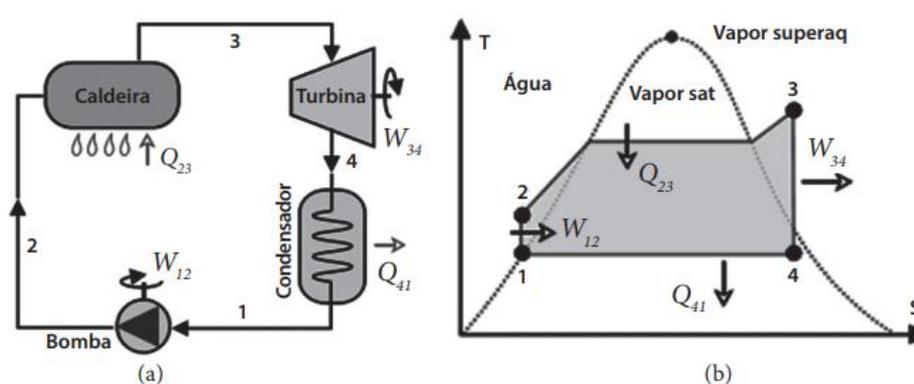
4.2.2 Turbinas de Ciclo Rankine

O ciclo de Rankine ideal consiste em um modelo termodinâmico que é aplicado na análise aproximada dos processos térmicos que ocorrem nas turbinas a vapor. Nesse ciclo, diferentemente do ciclo de Brayton, os gases de combustão não

entram em contato com o fluido (geralmente água) que transporta energia, da qual se difere também por estar em um ciclo fechado (COSTA, 2006).

Para a geração elétrica, o ciclo a vapor mais utilizado é o Rankine. As turbinas a vapor que realizam esses ciclos são compostas basicamente por uma caldeira, uma turbina a vapor, um condensador e uma bomba, conforme ilustrado na Figura 10. Esse ciclo é composto de 4 etapas. Na primeira a água (ou outro fluido) é bombeada e comprimida entre os pontos 1 e 2. Posteriormente, o fluido segue para a caldeira onde o calor produzido pela combustão dos gases é transferido por meio de serpentinas a esse fluido até que ocorra a formação de vapor saturado. Na terceira etapa, entre os pontos 3 e 4, o vapor saturado é expandido numa turbina e realiza trabalho. Por fim, o fluido de trabalho passa por um condensador, onde libera calor a pressão constante, sendo então novamente bombeado, reiniciando o ciclo (TOLMASQUIM, 2016; WANKE, 2019).

Figura 10 - Ciclo de Rankine Básico e Diagrama T-s



Fonte: Uberti e Indrusiak (2015)

Conforme o diagrama T-s da Figura 10, que representa o ciclo de Rankine ideal, Wanke (2019) destaca que o bombeamento e a expansão são processos isentrópicos, isto é, reversíveis e adiabáticos. A pressão no condensador e no evaporador é constante e além disso, um fluido acima do seu ponto crítico de pressão e temperatura é chamado supercrítico. Abaixo desse ponto é nomeado subcrítico.

Em termos da eficiência, o ciclo de Rankine pode ser analisado através do balanço de energia por unidade de massa, conforme a Equação 14 tratada por Uberti e Indrusiak (2015)

$$W_{34} = Q_{23} - Q_{41} - W_{12} \quad (14)$$

Em que Q_{23} e Q_{41} são, respectivamente, os calores fornecidos pela caldeira e rejeitado pelo condensador, W_{34} e W_{12} são os trabalhos gerados pela turbina a vapor e o trabalho consumido pela bomba de alimentação da caldeira. Todas as grandezas são referidas a unidade de massa e são dadas em $\frac{kJ}{kg}$. Portanto, verifica-se que o trabalho líquido depende diretamente três fatores que podem ser controlados para que a eficiência termodinâmica seja aumentada. Esse trabalho líquido pode ser compreendido também pela área interna do diagrama T-s Figura 10. Segundo Uberti e Indrusiak (2015), a eficiência desse ciclo a vapor é sensivelmente afetada pelas temperaturas médias em que o calor é transferido para o fluido na caldeira e como o calor é rejeitado pelo condensador.

Tolmasquim (2016) destaca que o ciclo Rankine pode apresentar as seguintes variações: ciclo Rankine com reaquecimento, Regenerativo, Supercrítico e Orgânico. No ciclo Rankine com reaquecimento, após o vapor passar pela primeira turbina de alta pressão ele é reaquecido, e em seguida passa pela segunda turbina de baixa pressão. As vantagens deste arranjo é o aumento da durabilidade do equipamento por evitar a condensação na fase de expansão, e o aumento da eficiência do ciclo.

No ciclo Rankine regenerativo, o condensador e o ar que alimentam a caldeira são aquecidos utilizando vapor extraído da turbina. O aumento da temperatura da água de alimentação da caldeira reflete positivamente no aumento da eficiência do ciclo, demandando menos combustível para a mesma geração de vapor (TGM, 2012 *apud* TOLMASQUIM, 2016).

Segundo Tolmasquim (2016), o ciclo Rankine supercrítico utiliza como fluido de trabalho um fluido supercrítico, aquele a partir do qual não há mais distinção entre as fases líquida e gasosa. Para a água, o Ponto Crítico corresponde à pressão de 220,64 bar e temperatura de 374°C.

4.2.2.1 Equações analíticas do Ciclo Ideal de Rankine

Conforme tratado por Borgnakke *et al.* (2019), a análise do ciclo ideal de Rankine pode ser feita pelas equações apresentadas a seguir.

A modelagem que resulta nas equações descritas a seguir é aplicada aos quatro principais dispositivos do ciclo, que conforme a Figura 10 verifica-se que são a Bomba (1 a 2), caldeira/trocador de calor (2 a 3), turbina (3 a 4) e condensador/trocador de calor (4 a 1).

Com base no processo descrito e das leis da termodinâmica, o balanço de massa e energia do volume de controle permite obter as Equações 15, 16, 17 e 18 representadas a seguir.

$$\frac{\dot{Q}_{caldeira}}{\dot{m}} = h_2 - h_1 \quad (15)$$

$$\frac{\dot{W}_{turbina}}{\dot{m}} = h_2 - h_3 \quad (16)$$

$$\frac{\dot{Q}_{condesador}}{\dot{m}} = h_3 - h_4 \quad (17)$$

$$\frac{\dot{W}_{bomba}}{\dot{m}} = h_1 - h_4 \quad (18)$$

Em que:

\dot{Q} – taxa de entrada/saída do calor;

\dot{m} – massa por unidade de tempo;

\dot{W} – trabalho mecânico usado ou gerado pelo sistema;

$h_{1,2,3,4}$ – valores de entalpia específica obtida pelo diagrama T-s

Finalmente, a eficiência termodinâmica do Ciclo Ideal Rankine pode ser obtida a partir da Equação 16 da razão entre trabalho líquido do sistema e o calor fornecido.

$$\eta_t = \frac{\dot{W}_{turbina} - \dot{W}_{bomba}}{\dot{Q}_{caldeira}} \quad (19)$$

4.2.3 Ciclos Combinados

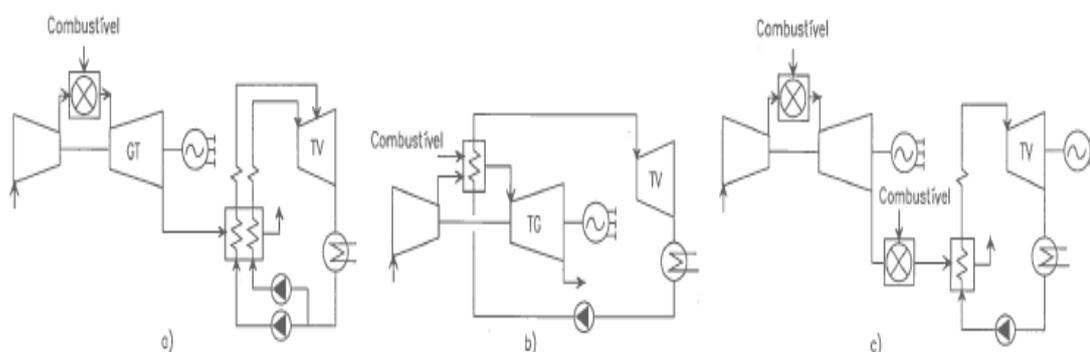
Um ciclo combinado, de acordo com Wanke (2019), consiste em dois ou mais ciclos, arrançados de forma que um ciclo possa reaproveitar calor rejeitado de outro, melhorando o desempenho do conjunto. Classicamente, o primeiro ciclo é o ciclo Brayton, que gera a maior parte da energia na turbina a gás. O ciclo de Brayton básico tem eficiência de 30 a 40 %, podendo chegar até cerca de 50% com modificações no ciclo básico. O ciclo de Brayton combinado com um ciclo Rankine a vapor pode chegar a eficiências da ordem de 60%. A troca do vapor d'água do ciclo Rankine por um fluido orgânico, naturalmente, determina diferentes eficiências e justamente por isso serão comparadas neste trabalho.

Sousa (2009) reitera que o ciclo combinado, diferentemente do ciclo aberto, trabalha com os dois ciclos paralelamente, ou seja, esse ciclo é formado pela combinação do ciclo aberto das turbinas a gás e com ciclo fechado das turbinas a vapor conhecido com ciclo de Rankine.

As termoeletricas de ciclo combinado utilizam um ciclo com turbina a gás acoplado a um ciclo com turbina a vapor. Constituem os sistemas mais modernos e eficientes, em que o combustível predominante é o gás natural (LORA; NASCIMENTO, 2004).

De acordo com Reis (2017), o ciclo combinado tem como princípio de funcionamento, a utilização dos ciclos Brayton e Rankine. Nesse tipo de ciclo obtém-se maior aproveitamento da energia inicial contida no combustível (maior eficiência), devido ao acoplamento térmico entre os dois ciclos. A Figura 11 ilustra os três tipos possíveis de ciclo combinado a gás e vapor: em série (a), em paralelo (b) e em série/paralelo (c).

Figura 11 - Os principais componentes das termelétricas de ciclo combinado



Fonte: Sousa (2009)

O ciclo é formado por uma turbina a gás, caldeira de recuperação de calor e turbina a vapor. O que irá diferenciar um do outro será seu modo de construção, mas basicamente todos os processos têm o mesmo objetivo de operação e geração (WANKE, 2019). Conforme Uberti e Indrusiak (2015), as modernas centrais termelétricas a gás natural que utilizam o ciclo combinado possuem eficiências térmicas de aproximadamente 60%, valor esse bem superior a eficiência das termelétricas a carvão que se situa em torno de 40%.

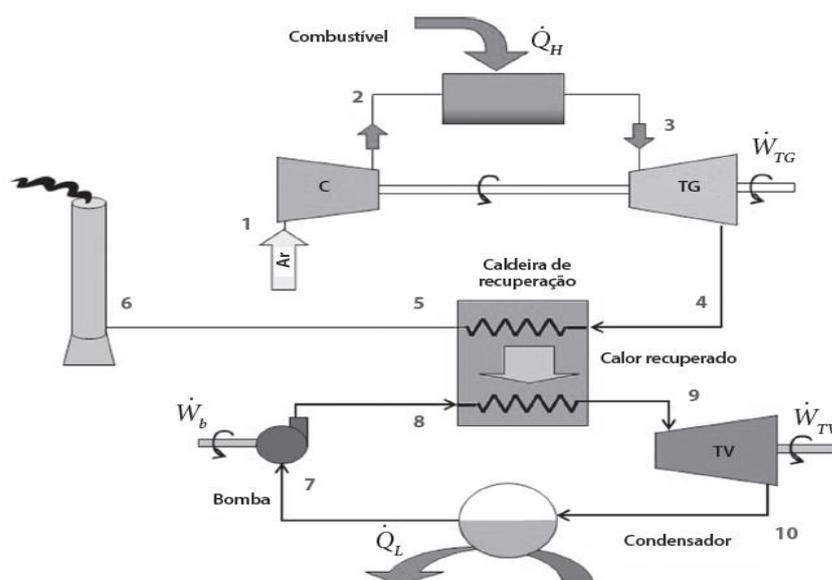
Para Aneel (2014) a tecnologia do ciclo combinado é recente (década de 80) e passa por processo de expansão em todo o mundo, inclusive no Brasil. Embora exija maiores investimentos que aqueles aplicados nas usinas de ciclo simples, aumenta a eficiência do processo de geração. Em outras palavras: com a mesma quantidade de gás natural é possível obter maior produção de energia elétrica. No ciclo simples, o grau de eficiência é de 38,7% segundo análise sobre o gás natural constante do Plano Nacional de Energia 2030. Já na termelétrica a ciclo combinado, o grau de eficiência fica em torno de 50%.

Ainda de acordo com Aneel (2014) a cogeração pode ser realizada com todos os combustíveis usados em usinas termelétricas – por exemplo, óleos, biomassa e carvão, biogás e gás natural. Em síntese, o processo de cogeração permite a produção simultânea de energia elétrica, energia térmica e vapor. No caso do biogás, os dois últimos são produzidos a partir do calor gerado na produção da eletricidade por usinas em ciclo simples e que, se não utilizado, seria liberado na atmosfera. Este calor é recuperado antes da emissão dos gases e destinado à produção de vapor, do ar quente ou da refrigeração.

Um dos argumentos favoráveis à cogeração é a possibilidade de utilização da energia que naturalmente se perde no processo de geração da eletricidade nas termelétricas. Outro é a independência em relação ao suprimento fornecido por terceiros – no caso brasileiro, pelas distribuidoras ou comercializadoras de energia elétrica. Finalmente, um terceiro é a redução do volume de gases lançados na atmosfera, o que pode ser um fator de competitividade no momento atual, em que os consumidores estão cada vez mais exigentes em relação ao impacto ambiental provocado pelos produtos que adquirem (ANEEL, 2014).

Na Figura 12 encontra-se ilustrado os componentes genéricos presentes em um ciclo combinado. Entre os pontos 1 e 4 verifica-se o ciclo básico de Brayton e entre os pontos 7 a 10 o ciclo Rankine.

Figura 12 – Exemplificação esquemática do Ciclo Combinado



Fonte: Uberti e Indrusiak (2015)

De acordo com Uberti e Indrusiak (2015), em termos da eficiência térmica, a análise do ciclo combinado pode ser realizada conforme a Equação 20 a seguir.

$$\eta = \frac{\dot{W}_{TG} + \dot{W}_{TV}}{\dot{Q}_F} \quad (20)$$

em que \dot{W}_{TG} e \dot{W}_{TV} representam as potências geradas pelos ciclos Brayton e Rankine, respectivamente, e \dot{Q}_F representa a energia fornecida pelo combustível, todas em unidades de taxas de variação dados e MW ou MJ/s. O cálculo de energia fornecida ao sistema, por sua vez, é dado pela Equação 21.

$$\dot{Q}_F = \dot{m}_c(PCI) \quad (21)$$

em que \dot{m}_c é a vazão mássica de combustível, em kg/s e PCI é o Poder Calorífico Inferior do combustível, em MJ/kg.

4.2.4 Motores de Combustão Interna do ciclo de Otto

Motores térmicos de combustão interna são máquinas responsáveis em transformar a energia calorífica em energia mecânica. Segundo Souza 2016, tais motores são as máquinas primárias mais utilizadas na geração de eletricidade quando se realiza o aproveitamento do biogás.

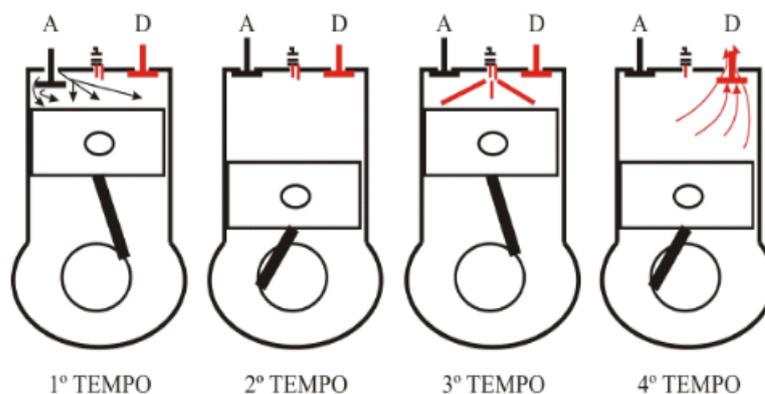
A eficiência das máquinas térmicas de combustão depende do ciclo utilizado. Conforme Antônio (2016), o ciclo a Diesel tem eficiências da ordem de 35 a 45%, enquanto o ciclo Otto ou a gasolina apresentam eficiência da ordem de 15 a 18%. Ainda segundo o autor, ambos os tipos de motores a combustão admitem o biogás como combustível primário, sendo que no ciclo de Otto a ignição é feita por centelha enquanto no ciclo a Diesel essa ocorre por compressão, porém ainda com pequena quantidade de óleo diesel para iniciar a queima.

De Souza (2016) destaca que a maioria dos motores de ignição por centelha utilizam o gás natural. Assim, o processo de conversão para queima do biogás que possui composições próximas a 60% de metano é facilitado. A adaptação consiste em uma regulação no carburador para a queima de uma mistura ar e combustível mais pobre. Já a adaptação do motor a diesel é feita pela introdução de um misturador na entrada do ar, antes de comprimido, permanecendo o restante sob o mesmo princípio. Segundo o autor, a redução do consumo de diesel no modo dual é acima de 80%.

O conjunto motor gerador a biogás mais utilizado atualmente é o motor de ignição por centelha, isto é, aqueles que operam no ciclo de Otto. Esses motores

operam em ciclos de quatro tempos, pois seu funcionamento ocorre sequencialmente em quatro etapas conforme mostra a Figura 13.

Figura 13 - Ciclo Otto de 4 tempos

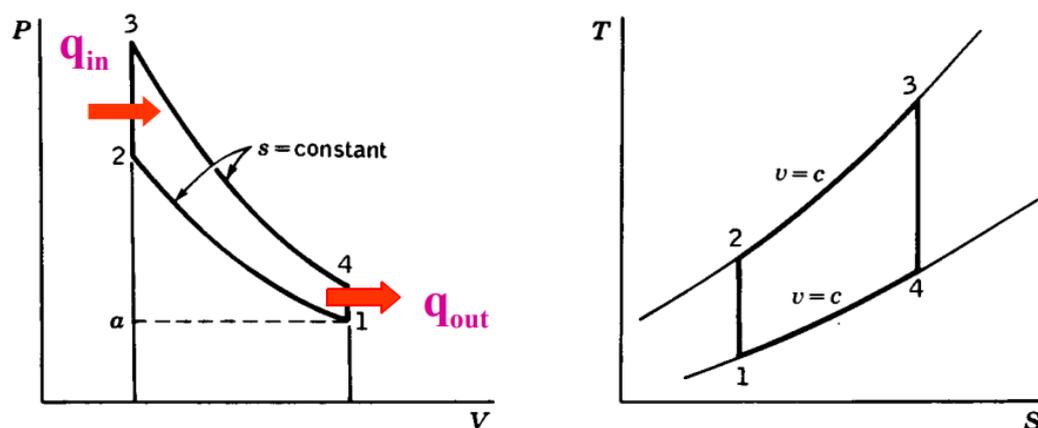


Fonte: Souza (2016)

Conforme Anônio (2016) explica, no 1º tempo ocorre a admissão da mistura de combustível com o ar. O pistão desce e a válvula de admissão é aberta possibilitando a entrada da mistura. No 2º tempo ocorre a compressão. Estando as válvulas fechadas, o pistão sobe e comprime a mistura de ar e combustível. No 3º tempo ocorre a explosão. Quando o pistão atinge o ponto de compressão máximo uma faísca elétrica provocada pela vela provoca a explosão do combustível, a explosão empurra o pistão para baixo. No 4º tempo, a válvula de escape está aberta possibilitando a expulsão dos gases resultantes da explosão. Por fim, reinicia-se o ciclo.

Considerando o ciclo de Otto ideal, conforme ilustra a Figura 14, entre o tempo 1 e 2 ocorre a compressão isentrópica do ar, entre o processo 2 e 3 o calor é transferido durante a ignição do combustível. No tempo entre 3 e 4 ocorre uma expansão isentrópica e no tempo de 4 a 1 ocorre a rejeição de calor (DE SOUZA, 2016). Em termos do trabalho mecânico, a força da explosão é transferida ao pistão e através de uma manivela essa força é transferida ao eixo de transmissão.

Figura 14 - Ciclo padrão de ar Otto: a) Diagrama P-V; b) Diagrama (T-s)



Fonte: Franklin (2019)

No aproveitamento do biogás utilizando motores a combustão de ciclo Otto, deve-se analisar os parâmetros como: rendimento total ou eficiência de conversão do combustível; potência efetiva do motor e consumo específico (DE SOUZA, 2016). A modelagem matemática desse ciclo é apresentada na subseção seguinte.

4.2.4.1 Equações analíticas do Ciclo Ideal de Otto

Conforme Franklin (2019) aborda e considerando a Figura 14, o modelo termodinâmico do ciclo de Otto pode ser obtido a partir dos processos adiabáticos que ocorrem entre 1-2 e 3-4, resultando nas relações entre temperatura e volume mostrado nas Equações 22, 23 e 24 a seguir.

$$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{V_1}{V_2}\right)^{k-1} \quad (22)$$

$$\frac{T_3}{T_4} = \left(\frac{V_4}{V_3}\right)^{k-1} \quad (23)$$

$$\frac{T_2}{T_1} = \frac{T_3}{T_4} \quad (24)$$

Em que V_i e T_i ($i = [1\ 4]$) representam, respectivamente, o volume e a temperatura em cada ponto ilustrado na Figura 14. A constante k presente nas Equações 22 e 23 é a razão dos calores específicos definido anterior na Equação 4.

Considerando os diagramas da Figura 14, a primeira Lei da Termodinâmica aplicada ao processo de adição de calor a volume constante entre os pontos 2-3 (Q_H) e remoção de calor entre os pontos 4-1 (Q_L) é dada pela Equação 25 e 26, respectivamente, como (FRANKLIN, 2019):

$$Q_H = mC_v(T_3 - T_2) \quad (25)$$

$$Q_L = mC_v(T_4 - T_1) \quad (26)$$

A eficiência térmica do motor é então dada pela Equação

$$\eta_t = 1 - \frac{Q_L}{Q_H} = 1 - \frac{T_1 \left(\frac{T_4}{T_1} - 1 \right)}{T_2 \left(\frac{T_3}{T_2} - 1 \right)} \quad (27)$$

Definindo $r = V_1/V_2$ e combinando a Equação (27) com as Equação de 22 a 24, a eficiência térmica em termos simplificados é também dada pela Equação 28 a seguir.

$$\eta_t = 1 - \frac{T_1}{T_2} = 1 - \frac{1}{r^{(k-1)}} \quad (28)$$

4.2.5 Comparativo Entre as Tecnologias de Conversão

Em relação às informações técnicas básicas referentes a cada tipo de tecnologia de conversão do biogás apresentadas nos tópicos anteriores, Pécora (2006) apresenta a seguinte síntese dos equipamentos comercialmente disponíveis:

a) Motores a Gás:

- Potência de 30 kW – 20 MW
- Rendimento com biogás em torno de 30 a 34%

- Emissões de NOx:
 - Menores que 3.000 ppm
 - Motores com baixa emissão: menores que 250 ppm

- b) Motores Diesel: Biogás+Diesel
 - Rendimento de conversão elétrica em torno de 30 a 35%
 - Necessidade de diesel com baixo teor de enxofre
 - Emissões de NOx:
 - Média em torno de 27 ppm

- c) Turbinas a Gás para Biogás de Pequeno-Médio Porte
 - Potência de 500 kW – 150 MW
 - Rendimento em torno de 20 a 30%
 - Emissões de NOx:
 - Média em torno de 35 a 50 ppm

- d) Microturbinas
 - Potência de 30 kW – 100 kW
 - Rendimento em torno de 24 a 28%
 - Emissões de NOx:
 - Menores que 9 ppm

A partir desses dados, e também conforme Costa (2006) destaca, os motores de modo geral possuem maior eficiência de conversão elétrica, contudo, as turbinas a gás podem apresentar uma maior eficiência global quando operadas em sistemas de cogeração (eletricidade e calor). Outro aspecto a ser discutido refere-se à emissão de NOx (gás de grande impacto referente ao efeito estufa), sendo menor para as turbinas e microturbinas quando comparada aos motores. Dessa forma, o ganho ambiental obtido com as microturbinas é bem superior a tecnologia de grupo de geradores de combustão interna (Ciclo de Otto).

Conforme Suzuki (2011), os motores de combustão de queima pobre (conhecidos como *Lean Burn Engine*) que utilizam o biogás diretamente sem tratamento sofisticado de combustível são largamente utilizados nos EUA e Europa.

Contudo, no Brasil, esses motores são importados e possuem elevado custo de investimento e manutenção. Ainda segundo o autor, no Brasil, é amplamente utilizado o ciclo de Rankine em função do setor sucroalcooleiro, contando com equipamentos e fornecedores em território nacional, como caldeiras, turbinas a vapor, condensador e bombas. Já para o caso do biogás gerado a partir de esterco, a tecnologia é restrita a motores de pequeno porte (50 a 100 kW) e os equipamentos, são, na maioria das vezes de tecnologia nacional, utilizando-se motores de veículos adaptados ou novos, como exemplo a Mercedes Benz que possui uma linha especial para Biogás.

Na complementação aos autores citados referente ao comparativo entres as tecnologias de conversão, no Anexo A e B encontra-se em forma de tabela um comparativo entre as vantagens e desvantagens das tecnologias citadas bem como o comparativo técnico entre elas.

4.3 Geradores de Eletricidade

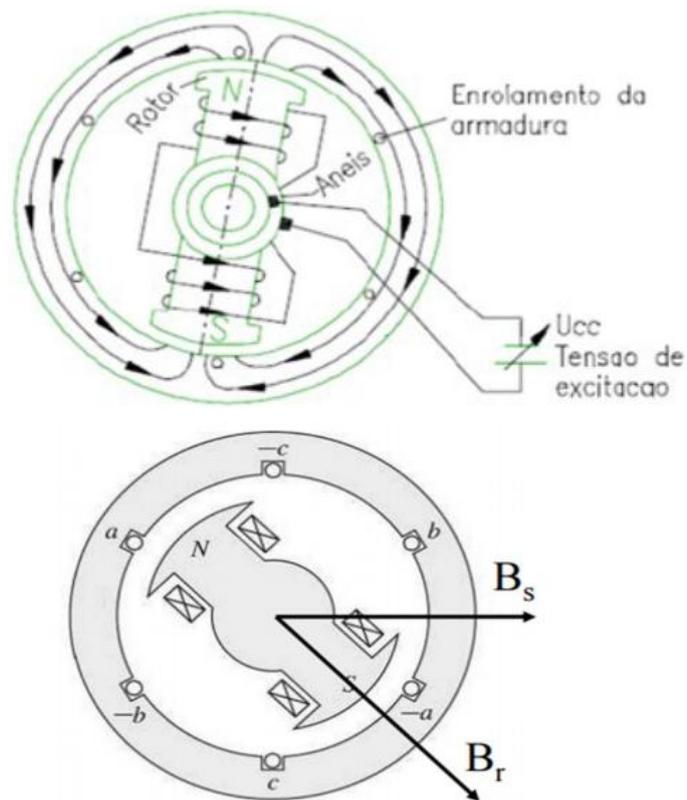
O gerador de eletricidade ou alternadores são máquinas secundárias de um sistema de aproveitamento energético do biogás, transformando a energia mecânica proveniente da combustão do biogás, seja por tecnologias que utilizam turbinas (Ciclo de Brayton, Rankine ou Combinado) ou motores de combustão (Ciclo de Otto ou a Diesel) em energia elétrica.

Um gerador é composto por uma parte fixa (carcaça) na qual se encontram presentes os enrolamentos trifásicos e por uma parte móvel chamada de rotor, formado por um ímã permanente ou por um eletroímã quando se dispõe de enrolamentos alimentados por corrente contínua. Os geradores operam sob os princípios da conversão eletromagnética de energia, estando presentes os fenômenos descritos pela Lei de Faraday-Lenz (CHAPMAN, 2013; FITZGERALD, 2006).

Na Figura 15, exemplifica-se o esquema de funcionamento de um gerador síncrono elementar. A máquina primária é acoplada mecanicamente ao rotor na qual estão alojados os polos magnéticos da máquina e a força mecânica rotativa do eixo faz com que esses polos (Br) girem no interior do gerador. Conforme tratado em

Chapman (2013), o campo magnético girante, atravessa os condutores que formam o enrolamento do estator. A variação do fluxo magnético, nesses enrolamentos, faz surgir uma tensão induzida, alternada e trifásica nos terminais da máquina. Ao conectar os terminais do gerador a uma carga a tensão induzida faz com que circule corrente pelo estator e pela carga, fazendo aparecer também um campo magnético B_s que é “arrastado” por B_r . Os enrolamentos do estator são posicionados com diferença angular de 120° espaciais e dessa forma a tensão induzida nos três enrolamentos serão defasadas de 120° elétricos.

Figura 15 - Esquemática de um gerador síncrono elementar.



Fonte: Kunz (2013)

A frequência das variáveis elétricas de saída, tensão e corrente, em um gerador, é função do número de polos da qual a máquina foi projetada e pode ser calculado pela Equação 41.

$$f_{se} = \frac{P}{120} \times n_s \quad (41)$$

Em que:

f_{se} – frequência elétrica nos enrolamentos do estator (Hz ou ciclos por segundo);

P – número de polos;

n_s – rotação síncrona ou rotação mecânica (rpm).

Baseado na Equação 41, na Tabela 6 apresenta-se a relação do número de polos, da velocidade síncrona e da frequência elétrica gerada para diferentes configurações.

Tabela 6 - Frequência elétrica gerada em função da velocidade síncrona e do número de polos.

NÚMERO DE POLOS	FREQUÊNCIA	
	50 (Hz)	60 (Hz)
2	3600 rpm	3000 rpm
4	1800 rpm	1500 rpm
6	1200 rpm	1000 rpm
8	900 rpm	750 rpm
10	600 rpm	720 rpm
12	500 rpm	600 rpm

Fonte: Kunz (2013)

De acordo com Kunz (2013), em aplicações que utilizam turbinas a vapor, o número de polos da máquina é reduzido, devido às turbinas operarem com elevada velocidade síncrona.

Os geradores podem gerar eletricidade em diferentes níveis de tensão, de acordo com o tipo de ligação trifásica que é realizada nos terminais de saída, sendo as mais comuns 127/220, 220/380, 254/440V.

Um dos principais parâmetros a serem analisados em um gerador refere-se a sua potência nominal de operação. Na geração de eletricidade a partir do biogás, esse parâmetro indica qual gerador deverá ser utilizado em função da capacidade dos processos de conversão energética. Esse valor é verificado por meio dos dados de placa do gerador fornecidos pelo fabricante e se relaciona com as grandezas de saída do gerador conforme a Equação 42.

$$S = \sqrt{3}V_L I_L \quad (42)$$

Em que:

S – Potência aparente [VA];

V_L – Tensão de linha [V];

I_L – Corrente de linha [A];

Outro importante parâmetro do gerador é seu fator de potência, sendo obtido pela relação entre a potência ativa (P) que é medida em Watts e a potência aparente (S) conforme a Equação 43.

$$fp = \cos(\theta) = \frac{P}{S} \quad (43)$$

A potência ativa por sua vez é determinada conforme a Equação 44.

$$P = \sqrt{3}VI\cos(\theta) \quad (44)$$

Quanto menor for o fp , maior a quantidade de potência reativa produzida (KVAr) e conseqüentemente menor o valor de potência útil (W) disponível.

O rendimento de um gerador elétrico é definido pela relação entre sua potência ativa P_g produzida (kW) e a potência mecânica P_m desenvolvida pelo eixo da máquina, conforme expresso na Equação 45.

$$\eta_g = \frac{P_g}{P_m} \quad (45)$$

Conforme Kunz (2013), o rendimento de um gerador varia de acordo com a carga, e na operação nominal possui rendimento entre 80 e 100% da potência máxima. Para fins de projeto o rendimento encontra-se próximo de 90%.

A potência aparente do gerador pode então ser calculada a partir da potência do motor de acionamento (P_m), da eficiência do gerador e da adoção do fator mínimo de 0,92 estipulado pela ANEEL. Quando P_m é dado em CV (Cavalo Vapor), seu valor deverá ser multiplicado por 0,735 para se obter o valor respectivo da potência ativa

[kW]. A potência aparente do gerador em função desses parâmetros é então calculada conforme a Equação 46.

$$S = \frac{P_m \times \eta_g}{100 \times f_p} \quad (46)$$

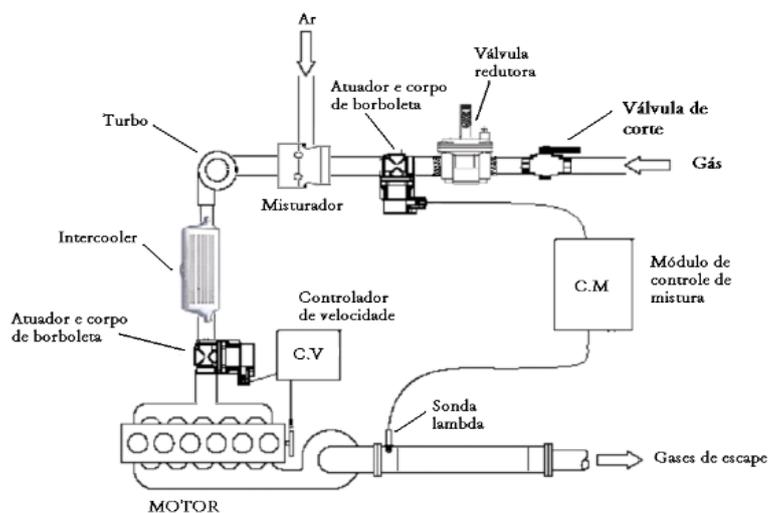
Conforme explicitado até aqui, na escolha dos geradores para uma determinada aplicação torna-se necessário o conhecimento dos seus parâmetros técnicos e operacionais, como potência nominal, tensão nominal, fator de potência, rotação, frequência, número de polos, tipo de excitação, acoplamento com a máquina primária, dentre outros.

4.3.1 Grupo Motor Gerador

O grupo motor gerador refere-se ao conjunto formado por um motor como máquina primária e um gerador de eletricidade como máquina secundária. As máquinas podem estar mecanicamente acopladas de diferentes formas, como por meio de um redutor, correias, polias ou mesmo acoplamento direto. A eficiência da conversão mecânica em elétrica pode alcançar até 90% na velocidade síncrona (SOUZA, 2016).

Além dos componentes já citados, conforme a Figura 16, o grupo gerador motor conta com vários outros dispositivos auxiliares capazes de regular o processo de combustão, a velocidade de operação e outros fatores a fim de se manter parâmetros operacionais desejados em projeto. A descrição operacional desses componentes pode ser encontrada em (COSTA, 2006).

Figura 16 - Equipamentos da operação de um conjunto motor gerador



fonte: Souza (2016)

No aproveitamento do biogás em motores, os mais utilizados são aqueles que operam no ciclo de Otto (ignição por centelha) por serem relativamente mais baratos que motores a diesel. Conforme Coldbella (2006), um grupo motor gerador possui eficiência relativamente baixa no quesito de conversão energética do biogás em eletricidade, variando entre 25% e 38%. Nesse aspecto, motores ciclo Otto apresentam rendimento de 3 a 5% menores que motores diesel operando a biogás. Contudo, quando o sistema opera em baixas cargas essa eficiência poderá cair pela metade (DE SOUZA, 2016).

De Souza (2016) destaca que existem atualmente empresas internacionais e nacionais fornecendo soluções para geração de eletricidade via biogás por meio da comercialização de motores geradores. Na Tabela 7 é mostrado um compilado realizado pelo autor sobre alguns modelos e marcas e suas especificações conforme dados do fabricante.

Tabela 7 - Especificações de motores geradores a biogás de acordo com o fabricante.

FABRICANTE	GE - JENBACHER		CATERPILLAR		LEÃO ENERGIA		BIOGÁS MOTORES
MODELO	JMS 208 GS - B.LC	JMC 420 GS - B. L	G3406	G3520 refrigerador a água	LGG70	LGG120	OM 366
POTENCIA (KW)	330	1413	132	1600	50	100	
Nº DE CILINDROS	8l	20 V	6l	20V	4l	6l	6l
CURSO (MM)	145	185	164	190	-	-	-
DIÂMETRO (MM)	135	145	137	170	-	-	-
CONSUMO DE BIOGÁS (M³/H)	-	-	62,2 (75% de carga)	647 (75% de carga)	30	50	
GERADOR	-	-	Auto excitado 4 polos	Permanent magneto 6 polos	Cramacho 4 polos	Cramacho 4 polos	4 polos
ROTAÇÃO (RPM)	1800	1200	1800	1200	1800	1800	1800
TENSÃO (V)	-	-	220	480	220/380	220/380	220/380

Fonte: De Souza (2016)

Para Kunz (2013), há diferentes casos específicos de projetos de geradores a biogás e a padronização dessa tecnologia por parte dos fabricantes pode se tornar inviável na prática devido a critérios específicos como requisitos de ambiente ou dos consumidores.

4.3.1.1 Critérios de Desempenho e Dimensionamento dos Conjuntos Geradores a Biogás

A eficiência total em um processo de conversão do biogás em eletricidade em um motor gerador é calculada conforme a Equação 47 (DE SOUZA, 2016).

$$\eta = \frac{P}{V \times PCI} \quad (47)$$

Em que:

P – Potência útil de geração de eletricidade (kW);

V – vazão volumétrica de biogás (m³/h);

PCI – Poder Calorífico Inferior do biogás (kWh/m³).

A partir do conhecimento do PCI do biogás, quantifica-se a energia elétrica gerada por cada metro cúbico desse combustível a partir da Equação.

$$PTE = PCI \times PB \quad (48)$$

Em que:

PTE – Potencial teórico de produção de eletricidade (kWh/dia);

PB – Produção anual de Biogás.

Considerando-se a eficiência global de conversão nas máquinas térmicas (turbinas a gás, turbinas a vapor, motor gerador), o potencial técnico de conversão/geração de eletricidade ($PTCE$ - kWh/dia) é calculado conforme a Equação 49.

$$PTCE = \frac{PTE \times \eta}{100} \quad (49)$$

Por fim, considerando-se o número de horas diárias de operação do sistema de conversão e o fator de potência na qual o gerador opera, a potência elétrica da planta de geração é obtida conforme a Equação 50.

$$POT = \frac{PTCE}{HO \times \cos(\theta)} \quad (50)$$

As equações são úteis tanto a grupos motores geradores quanto aqueles sistemas de conversão que operam em ciclos a vapor (Ciclo Rankine) ou a gás (Ciclo Brayton). Contudo, deve-se considerar a eficiência de cada ciclo com base na sua operação específica e nas tecnologias utilizadas. Em Pecora (2006) e Costa (2006) é possível consultar dados empíricos acerca do rendimento e produção de eletricidade utilizando a tecnologia de Microturbinas a gás.

4.4 Fatores Econômicos de Análise da Produção de Biogás em Unidades Geradoras de Eletricidade

A geração de eletricidade por meio do biogás pode ocorrer de diversas formas. A princípio, devem ser analisadas as tecnologias utilizadas no processo de tratamento de efluentes tendo como base os parâmetros definidos pelos princípios de sustentabilidade sob o ponto de vista econômico, social e ambiental (PECORA, 2006). Posteriormente, com base no biogás obtido deve-se escolher a tecnologia capaz de realizar o melhor aproveitamento energético desse combustível. Isso implica a adequação das diferentes formas de geração, sejam por caldeiras e equipamentos de transferência de energia térmica, ciclos de cogeração de turbinas a vapor ou a gás ou cogeração utilizando motores de combustão interna (COSTA, 2006).

Para escolha adequada de uma planta energética a biogás, os parâmetros abordados a seguir são utilizados na avaliação e comparação das tecnologias a serem utilizadas (ENGENHARIA & PROJETOS, 2001):

- Área ocupada pela ETE (Estação de tratamento de efluente) – depende da quantidade de material a ser tratado e da tecnologia empregada nesse tratamento. Na comparação dos vários processos de tratamento, será mais viável aquele que apresenta a menor relação entre a área ocupada pela ETE em função do número de habitantes atendidos;
- Custo de Implantação – fatores econômicos de projeto permitem determinar a viabilidade de sua execução. O custo varia de acordo com a tecnologia empregada, o nível de automação requerido, a vazão a ser tratada bem como a eficiência desejada para o tratamento. Esse parâmetro geralmente é também estabelecido pelo custo associado e o número de habitantes atendidos.
- Potência Instalada – esse parâmetro é função do tipo de tecnologia escolhida, do volume dos resíduos orgânicos a serem tratados e da sua vazão de saída. A avaliação desse parâmetro ocorre por meio da potência dos equipamentos mecânicos instalados e o número de habitantes atendidos.
- Produção de lodo – consiste em um fator de grande impacto nos custos de operação do sistema e depende também da tecnologia empregada, da

quantidade de material orgânico tratado, o grau de eficiência e da vazão de saída. A relação a ser avaliada refere-se a massa de sólidos produzidas e do número de habitantes atendidos.

- Remoção de Nutrientes – a presença de nutrientes como, nitrogênio e fósforo na matéria orgânica, possui efeitos negativos sobre o equilíbrio de ecossistemas, e para isso, devem ser removidos do processo quando o intuito é o aproveitamento posterior para adubos e biofertilizantes. A remoção desses nutrientes é feita geralmente em unidades de tratamento complementares do processo ou então através de estratégias operacionais. A avaliação desse parâmetro baseia-se individualmente em cada nutriente e o nível de remoção pretendido.
- Simplicidade Operacional – a operação, manutenção e controle, está intimamente relacionado à tecnologia empregada no tratamento e dos equipamentos presentes no sistema. Quanto maior o nível de investimento em sistemas de controle automático, menores os riscos de operação.
- Vida útil – parâmetro que estabelece o número de anos em que a estação de tratamento opera com eficiência necessária para o tratamento da matéria orgânica. Esse fator depende da qualidade da manutenção, da fiscalização do processo e da variação das condições ambientais e operacionais.

Conforme Pecora (2006), o biogás pode ser gerado tanto em unidades de tratamento anaeróbico de efluentes, como também em aterros sanitários. No primeiro caso, o aproveitamento do biogás pode contribuir significativamente na redução de consumo de eletricidade nas ETE's e no segundo caso, além de promover a autossuficiência energética, pode proporcionar uma receita adicional com a geração de adubos e biofertilizantes.

Abordados os parâmetros técnicos em relação à utilização do biogás para geração de energia elétrica, é possível realizar estimativas econômicas acerca da infraestrutura do sistema. A seguir apresentam-se as equações tratadas em Oliveira et. All. (2018) que fornecem informações relacionadas ao investimento de capital, custos de manutenção e outras variáveis.

O custo da energia elétrica obtida por meio do biogás é dado por:

$$C_e = \frac{(CAG+CAB)}{PE} \quad (29)$$

Em que:

C_e – Custo da eletricidade gerada via biogás, em $R\$/kWh$;

CAG – Custo anualizado de investimento no grupo gerador, em $R\$/ano$;

CAB – Gasto anual de biogás, em $R\$/ano$;

PE – Produção de eletricidade dos geradores a biogás, em kWh/ano .

A variável CAG da Equação 29 pode ser obtida a partir da Equação 30 que se segue.

$$CAG = CIG \times FRC + OM \quad (30)$$

Onde:

CIG – Custo de investimento no grupo gerador, em $R\%$;

FRC – Fator de recuperação de capita, calculado na Equação 31;

OM – Custo de organização e manutenção, calculado na Equação 32;

$$FRC = \frac{J \times (1+J)^n}{(1+J)^{n-1} - 1} \quad (31)$$

Onde:

J – Taxa de juros, em $\%/ano$;

n – Anos para recuperar o investimento;

$$POM = \frac{CIG \times POM}{100} \quad (32)$$

Onde:

POM – Gastos com operação e manutenção

A variável CAB da Equação 26 é obtida através da seguinte equação

$$CAB = CB \times CNB \quad (33)$$

Onde:

CB – Custo do biogás, em $R\$/m^3$, calculada na Equação 34;

CNB – Consumo por gerador de motores de biogás, em m^3/ano ;

$$CB = \frac{CAD}{PAB} \quad (34)$$

Onde:

CAD – Custo anualizado de investimento no biodigestor, em $R\$/ano$, calculado na Equação 35;

PAB – Produção anual de biogás, em m^3/ano ;

$$CAD = CIB \times FRC + \frac{OM}{100} \quad (35)$$

Onde:

CIB – Custo de investimento no biodigestor, em $R\%$

Por fim, a terceira variável da Equação 29, que representa a produção de eletricidade por meio da planta a biogás, é obtida a partir da Equação 36.

$$PE = Pot \times T \quad (36)$$

Em que:

Pot – Potência nominal da planta, em kW ;

T – Disponibilidade anual da planta;

Para se determinar o tempo de retorno do investimento RI , utiliza-se a Equação 37 a seguir.

$$RI = \frac{\ln\left(\frac{-k}{J-k}\right)}{\ln(1+j)} \quad (37)$$

Sendo a variável k determinada na Equação 38.

$$k = \frac{A}{CI} - \frac{OM}{100} \quad (38)$$

E a variável A determinada a partir da Equação 39.

$$A = CI \times \left(FRC + \frac{OM}{100} \right) \quad (39)$$

Onde:

A – Poder de despesa anual adquirido na rede, em $R\$/ano$

CI – Custo de investimento no sistema biodigestor/gerador-motor, em $R\%$, dado na Equação 40;

OM – Despesas de amortização e manutenção da Planta, em $R\$/ano$

$$CI = CIB + CIG \quad (40)$$

4.5 Geração de Eletricidade com Biogás

Segundo Costa (2006), a utilização do biogás apresenta-se como uma das melhores alternativas, a gestão de resíduos orgânicos no Brasil, embora não solucione todos os problemas que existem atualmente.

Salomon (2007) apresenta diversas vantagens da utilização do biogás para produção de energia elétrica. Com respeito aos impactos sociais, sua utilização promove a geração de empregos, fornece energia descentralizada, e colabora também para a viabilidade econômica dos sistemas de saneamento básico.

Para as prefeituras, o biogás fornece a possibilidade de uma receita extra com a venda da eletricidade gerada às concessionárias. Além disso, contribui também na viabilidade econômica do tratamento de lixo. Além disso, com o gerenciamento adequado da fonte de energia sustentável proveniente do biogás, ocorre uma menor rejeição social das instalações de saneamento.

Para as estações de tratamento de esgoto, gerenciadoras de aterros, setores de gerenciamento de resíduos industriais e outros, a energia gerada com biogás possibilita a redução na compra de energia da concessionária, possibilidade

eventual de venda de eletricidade à rede, como também a possibilidade do uso de processos de cogeração que aproveitam diferentes formas de energia, como eletricidade, calor, trabalho mecânicos, etc.

Já em relação ao meio ambiente, a geração de eletricidade via biogás permite a redução das emissões de metano para a atmosfera, promove a redução do consumo de combustíveis fósseis, reduz a geração de odores nas vizinhanças, evita a contaminação de lençol freático. Por fim, pode-se citar a melhoria nas condições dos lixões, sendo eles amplamente utilizados no Brasil como fim para o lixo produzido.

4.5.1 Geração Distribuída e as Políticas Públicas de Fomento a Utilização do Biogás no Brasil

O uso do biogás como fonte energética enquadra-se nos quesitos de geração distribuída (GD) no Brasil. Conforme a Aneel (2014), a Geração Distribuída consiste na geração de eletricidade por parte dos consumidores e baseiam-se na utilização de pequenos geradores movidos a fontes renováveis, tendo como característica suprir a demanda de energia elétrica em cargas próximas ao sistema de geração.

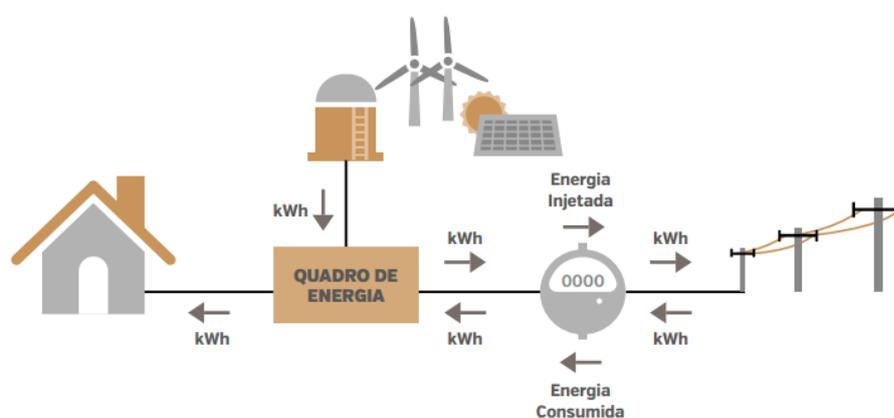
A operação dos sistemas de distribuição de energia elétrica em GD é relativamente recente nova no cenário nacional. Em 2012 a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) publicou a Resolução Normativa n 482, estabelecendo condições gerais para o acesso de microgeração e minigeração distribuída. Nesse tipo de geração enquadram-se as fontes que utilizam energia hidráulica, eólica, solar, biomassa ou cogeração qualificada. A partir dessa resolução, toda energia ativa injetada na rede pelas unidades geradoras em microgeração distribuída (Potência Instalada \leq 100 kW) ou minigeração distribuída (100 kW < Potência Instalada \leq 1 MW) é compensada. Nessa compensação, é avaliado o balanço líquido da energia gerada pela energia consumida (ANEEL, 2018).

Outro avanço aos incentivos à GD ocorreu em 2015 a partir da Resolução Normativa da ANEEL N°687, revisando e aprimorando alguns pontos da resolução anterior (ANEEL, 2015). Dentre eles, foram reduzidos os custos e tempo para conexão aos sistemas de energia elétrica, aumentaram-se os prazos dos créditos gerados pela energia de 36 para 60 meses, autorizaram-se empreendimentos com várias unidades consumidoras, abriu-se a possibilidade do autoconsumo remoto, além de se atualizar os limites da microgeração (Potência Instalada \leq 75 KW) e

minigeração ($75 \text{ kW} < \text{Potência Instalada} \leq 3 \text{ MW}$ para fontes hídricas ou 5 MW para as demais fontes renováveis).

A exemplificação de um sistema de Geração Distribuída encontra-se ilustrado na Figura 17. Conforme observado, a energia gerada por meio das fontes renováveis é direcionada ao quadro de energia da instalação elétrica. A energia é então destinada à alimentação das cargas elétricas dessa instalação e seu excedente (caso haja), é enviado a rede de distribuição na qual passa por um medidor bidirecional que contabiliza o fluxo de carga consumido e o gerado.

Figura 17 - Sistema de Geração Distribuída



Autor: Probiogás (2015)

Destacando a geração de energia a partir do Biogás, pode-se citar seu desenvolvimento a partir da Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), promulgada pela Lei n 12.305/2010. Buscando evoluir a produção de energia a partir dos RSU e do biogás de aterro no Brasil, essa lei apresenta diretrizes para a gestão integrada e gerenciamento de resíduos sólidos por parte dos geradores, do poder público e dos consumidores (ALBARRACIN, 2016). Desde 2014, resíduos sólidos sem viabilidade econômica para a recuperação devem ser depositados em aterros sanitários, enquanto lixões a céu aberto e aterros controlados devem ser fechados (PNRS, 2010).

Outro importante avanço na produção de energia utilizando RSU e biogás de aterro ocorreu em 2012 com a chamada de nº 14 da ANEEL, “Arranjos Técnicos e Comerciais para Inserção da Geração de Energia Elétrica a partir do Biogás oriundo de Resíduos e Efluentes Líquidos na Matriz Energética Brasileira”. Tal publicação

faz parte dos programas de pesquisa e desenvolvimento (P&D) da ANEEL, e conforme Gama, *et al* (2015) destaca, tinha por objetivo propor:

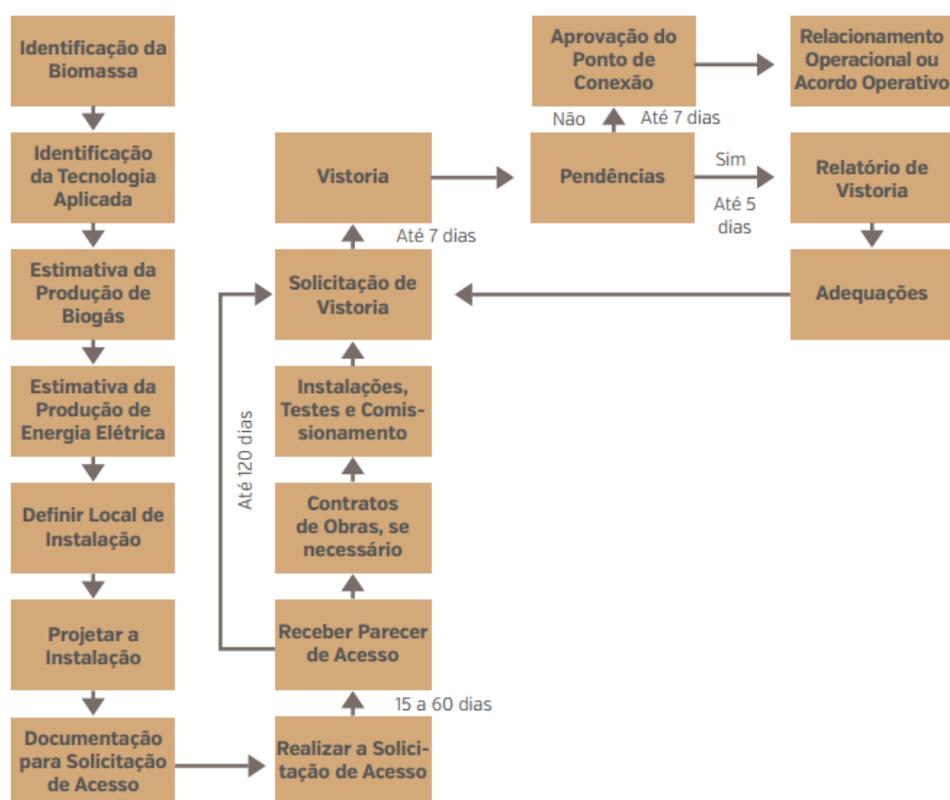
Arranjos técnicos e comerciais para projetos de geração de energia elétrica a partir do biogás de resíduos/efluentes líquidos, de forma Integrada e sustentável, buscando criar condições para o desenvolvimento de base tecnológica e infraestrutura técnica e tecnológica para inserção da geração utilizando biogás na matriz energética nacional.

O resultado final dessa publicação culminou em 23 propostas de projetos que envolviam um investimento inicial de R\$ 476 milhões e previsão de instalação de 33,7 MW (ALBARRACIN, 2016).

Relacionando agora a utilização do biogás na geração distribuída, segundo dados da Empresa de Pesquisa Energética, o mercado potencial para geração de energia elétrica com essa fonte de energia é de 2.850 MWm em 2050. Estima-se ainda que em 2026 somente em geração distribuída com biogás, este mercado será de 300 MW de potência instalada (CIBIOGÁS, 2018). Apesar desse mercado promissor, a realidade atual evidencia ainda a baixa utilização desse tipo de unidade geradora. Segundo dados do site da Aneel (2018), em 2018 das mais de 20 mil conexões em microgeração e minigeração, apenas 76 utilizam as fontes a biogás ou biomassa, enquanto a energia solar contava com 20.666 adesões. Conforme Cibiogás (2018) destaca, o tamanho médio para projetos a biogás é subjetivo pois varia de acordo com as atividade e tamanhos, mas na atualidade, tanto para consumo próprio quanto para autoconsumo remoto os valores médios da potência instalada de projetos de biogás são da ordem de 115 kW.

Para geração distribuída utilizando biogás como fonte primária, o Ministério das Cidades por meio da Probiogás elaborou um documento intitulado de “Guia Técnico Sobre Geração Distribuída de Energia Elétrica por Biogás em Estações de Tratamento de Esgoto” onde apresentam fundamentos acerca do biogás e as etapas necessárias para a conexão das ETE’s ao sistema de distribuição e os procedimentos para sua adesão ao sistema de compensação de energia elétrica. Tendo como base a Resolução Normativa n 482, o Módulo 3 do PRODIST e às normas técnicas da distribuidora local, apresenta-se nesse documento as etapas relativas ao processo e implementação da GD via biogás, conforme apresentado na Figura 18

Figura 18 - Procedimentos para GD utilizando biogás

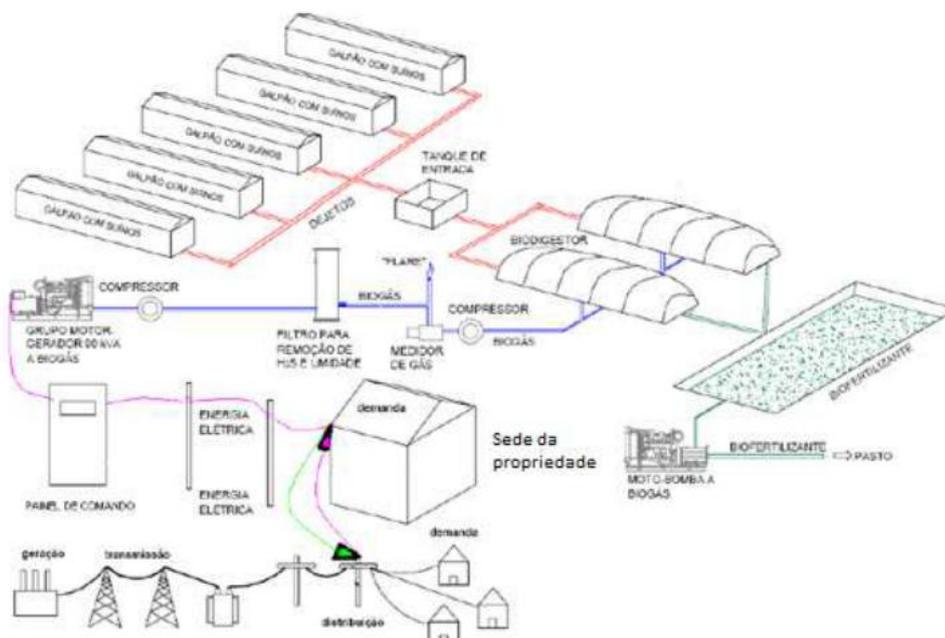


Fonte: Probiogás (2017)

Conforme pode ser verificado nas etapas desse diagrama, nas estimativas em um projeto de GD utilizando biogás é importante para o dimensionamento da planta que se conheça as propriedades do biogás como combustível, os fundamentos acerca do desempenho dos processos e equipamentos presentes na conversão da energia contida no biogás bem como dos geradores elétricos e as instalações elétricas.

A fim de exemplificação, na Figura 19 encontra-se ilustrado um sistema genérico de GD em suinoculturas. Os dejetos provenientes dos galpões são destinados ao tanque de entrada que alimenta os biodigestores. O biogás gerado é impulsionado por um compressor e passa por um medidor de gás e por um filtro purificador. Posteriormente, a energia elétrica é então obtida através de um grupo motor/gerador (ou outra tecnologia de conversão já discutida anteriormente) e é destinada a alimentação de cargas próximas ou cedida à concessionária de energia em um sistema de compensação.

Figura 19 - Geração distribuída a partir da suinocultura



Fonte: Casarin (2016)

Conforme Casarin (2016) destaca, as principais dificuldades na GD a partir do biogás deve-se aos elevados investimentos iniciais necessários na implementação de uma planta que realize esse tipo de geração, a falta de pesquisas na área de digestão anaeróbica e também a falta de melhorias contínuas e incentivos do governo federal.

4.6 Aproveitamentos de fontes de energia elétrica através de centrais a biogás

Ao longo do texto foram apresentados diversos conceitos que permitem compreender os processos de conversão de energia do biogás na geração de eletricidade. Em particular, mostraram-se diferentes tecnologias possíveis de uso e cada qual possui especificidades que devem ser consideradas na elaboração de um projeto. Apesar de operarem sob princípios semelhantes, os processos de obtenção do biogás requerem diferentes tipos de análise para escolha adequada do seu aproveitamento energético. Como exemplo, pode-se citar que a operação de um aterro de resíduos sólidos e urbanos (RSU) diferem em diversos aspectos em relação à operação de uma estação de tratamento de esgoto (ETE), que também diferem da operação de um sistema de resíduos agroindustriais ou animais. Ainda, processos que utilizam o mesmo tipo de resíduo na geração de biogás podem diferir

entre si de acordo com a capacidade de geração, do tipo de aproveitamento por unidades de geração (eletricidade) ou cogeração (eletricidade, calor), do rendimento esperado em função da qualidade das tecnologias e de seus custos associados, das regulamentações ambientais e de diversos outros fatores que não cabem a esse texto.

A partir das considerações apresentadas, essa seção aborda realizações práticas e teóricas de diferentes autores acerca da utilização do biogás, apresentando as tecnologias de conversão utilizadas na geração de eletricidade em diferentes aplicações. Nessa abordagem procura-se evidenciar o caráter prático e real do aproveitamento do biogás na geração de eletricidade.

4.6.1 Geração de energia elétrica através do biogás proveniente das estações de tratamento de efluentes

De acordo com Reis (2003), Hoje no Brasil, grande parte dos sistemas de tratamento de esgoto sanitário do país não comporta o volume despejado para atender a necessidade da população. Pontua-se que somente metades dos municípios Brasileiros fazem o uso da coleta de esgoto, sendo que a maior parte dessa coleta não recebe tratamento adequado para ser lançado nos rios. Diante desse fator degradante vários estudos para utilização desse efluente, têm sido estudados, dentre esses estudos o aproveitamento energético da digestão anaeróbica apresenta uma solução viável para lidar com esse problema corriqueiro.

Sabe-se que o potencial calórico do biogás proveniente das ETE (Estação Tratamento de esgoto) de acordo com estudos de Pecora (2006) e Costa (2006) é de cerca de 6,4KW por m³ de biogás, ou seja, é um valor muito alto para ser desperdiçado. Diante disso diversos estudos têm sido desenvolvidos os quais serão apresentados abaixo.

Utilizando dados disponibilizados de uma ETE como produção e composição do biogás, consumo geral de eletricidade e geração por meio de uma termoelétrica, Maciel e Cruz (2016) analisam a economia de um sistema de cogeração após a adoção do biogás na sua matriz energética. Conforme trata o artigo, o estudo é feito na ETE Arrudas do município de Sabará, operando para 1 milhão de habitantes e os resultados apresentados consistem da análise de dados em um período de 4 anos.

O sistema de aproveitamento do biogás utiliza uma pequena central termoelétrica para cogeração, gerando eletricidade por meio do acoplamento de geradores a microturbinas gerando calor para aquecer o lodo no interior dos biodigestores (aumentando a eficiência da reação anaeróbica). O sistema de biodigestão utiliza reatores do tipo UASB (*Up-flow Anaerobic Sludge Blanket*), e conforme o autor expõe são amplamente utilizados nas ETE do Brasil devido à praticidade de instalação em municípios densamente ocupados e que possuem integração de vários sistemas em um único processo químico. Os dados levantados pelo estudo apontaram um volume médio de biogás gerado de 402.000 m³/mês cuja composição de metano era próxima de 65% e poder calorífico médio de 6,894 kWh/m³. No período estudado constatou-se uma geração total de eletricidade na PCT de 20.000.2018 kWh, o que representou uma economia de 46,57% no consumo total de energia da ETE. A partir do investimento realizado na implementação da ETE, o tempo de retorno estimado levantado pelos autores é de 27 anos. Conforme apontam, apesar da reutilização do biogás parecer economicamente inviável para geração de eletricidade, existem incentivos econômico-climáticos que podem viabilizar o projeto, como exemplo os créditos de carbono. Os autores estimam que em sete anos a redução da emissão de CO₂ será de 26.237 toneladas.

Ainda em relação a ETE Arrudas de Sabará, Barros (2015) apresenta dados técnicos e operacionais da planta de cogeração em operação e destaca que a utilização das microturbinas na tecnologia de aproveitamento do biogás ultrapassa 80% de eficiência devido ao projeto customizado que reutiliza a energia térmica dissipada pelo gerador no pré-aquecimento do ar para a combustão. O painel de monitoramento e controle da ETE é exibido na Figura 20. Nessa infraestrutura, verifica-se que o biogás armazenado por dois gasômetros é destinado a central de purificação da qual é posteriormente enviado a três microturbinas C1000 da Capstone. No instante da operação apresentado na Figura 20, verifica-se que dos 2050 kW de demanda total de energia elétrica da ETE, 27% é fornecido pelo aproveitamento do biogás.

Figura 20 - Vista geral do sistema de monitoramento da cogeração da ETE Arrudas de Sabará (MG)



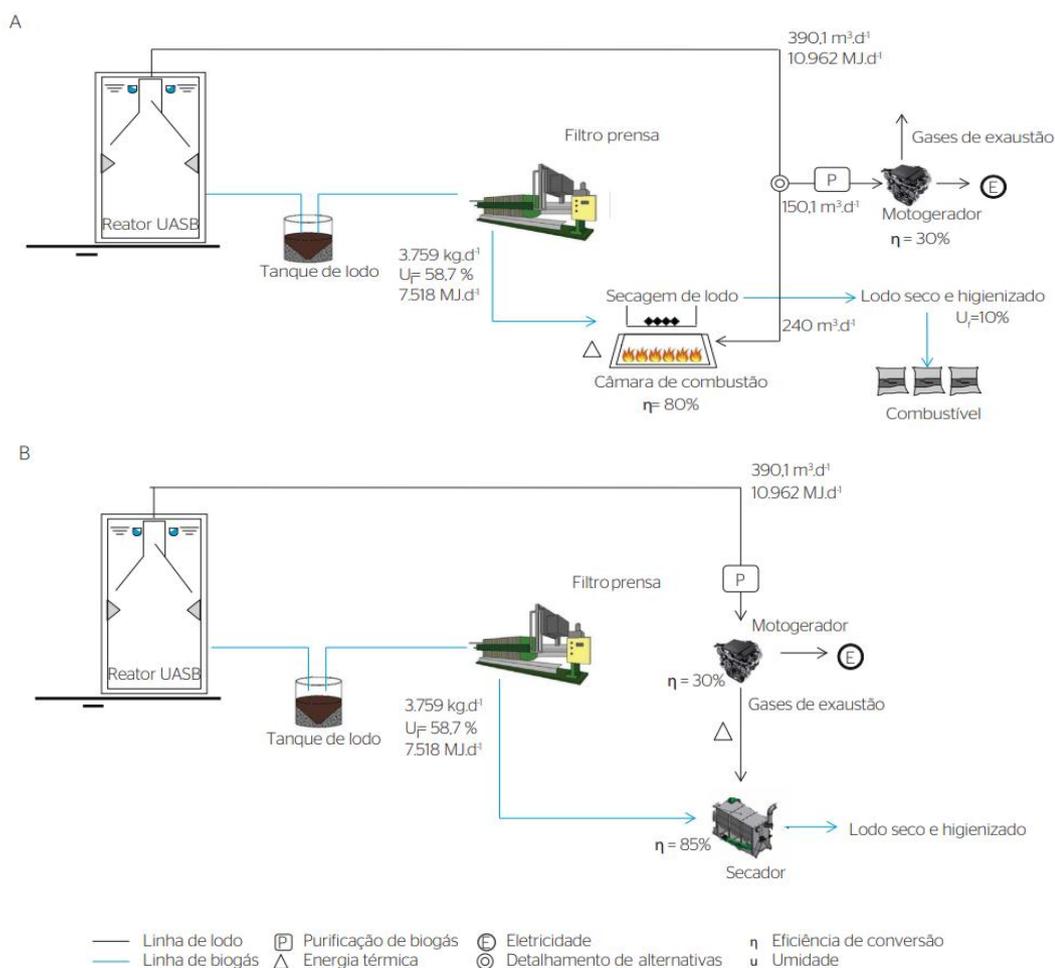
Fonte: Barros (2015)

Bilotta e Ross (2016) quantificam em seu artigo a energia fornecida pelo biogás gerado na ETE Santa Quitéria localizada na região metropolitana de Curitiba e que atendendo cerca de 190.000 habitantes. Utilizando dados disponibilizados (período de um ano) pela companhia de saneamento como temperatura do reator biológico, demanda química de oxigênio e vazão média do efluente, os autores empregam uma metodologia de análise energética que resultam em informações que mostram os benefícios ao se aproveitar o biogás. Os resultados obtidos mostraram uma produção diária de metano de 1.4272,2 m³ que tem potencial de gerar 65.280,3 kWh/mês, representando 59% da demanda média mensal da estação.

Ainda sob o aproveitamento do biogás em ETE, o artigo de Rosa *et al.* (2016) trata da análise do potencial de aproveitamento energético do biogás e do lodo gerado na ETE *Laboreaux* em Itabira (MG), dimensionada para uma população de 70.000 habitantes. A partir de dados dessa estação referente a um período de doze meses, os autores abordam dois cenários, sendo o primeiro deles o uso prioritário

do biogás para secagem térmica do lodo e o excedente de biogás para geração de eletricidade em um motor de combustão interna e o segundo em que as prioridades de uso são invertidas. Os autores destacam que atualmente o biogás gerado nos reatores UABS são queimados sem que haja o seu aproveitamento energético. Na análise realizada pelos autores, a produção média diária de biogás gerado é de 390 m³ cuja composição média de metano é de 78,2%. Sendo assim, foi estimado um potencial de energia da ordem de 10.962 MJ/dia. Como resultado final, no primeiro cenário os autores mostram que um sistema de geração de eletricidade via biogás permite atender 22,2% da demanda total de energia elétrica da ETE enquanto o segundo permite suprir 57,6% da demanda. A diferença entre ambos cenários resulta em diferentes volumes finais de lodo de acordo com a prioridade, geração de calor para secamento ou para eletricidade de acordo com a Figura 21 abaixo.

Figura 21 - Cenários de recuperação energética



Fonte: Rosa *et al.* (2016)

A imagem demonstra em A, o uso do biogás para combustão e geração de calor para secagem térmica do lodo, com o excesso do biogás utilizado para a geração de eletricidade. Já em B pode-se observar a geração de eletricidade, a partir de um motor de combustão interna utilizando biogás como combustível, com o aproveitamento do calor dos gases de exaustão do MCI para a secagem térmica de lodo desidratado.

4.6.2 Geração de energia elétrica através do biogás proveniente dejetos de animais

De acordo com ANEEL (2002) o Brasil atualmente é um dos maiores produtores de gado bovino, suíno e frango do mundo, sendo que no ano de 2016 área total de pastagens nos pais era cerca de quase 230 milhões de hectares. Ainda de acordo com autor essa atividade produz alto volume de dejetos e outros resíduos da produção, cujo descarte representa uma fonte de poluição do solo e também das reservas hídricas, bem como a emissão de gás metano (Efeito Estufa) na atmosfera. Diante dessa série de problemas se fez necessário estudos para amenizar essa situação e propor soluções sustentáveis para se corrigir essa situação. Sabendo se do alto poder calorífico proveniente dos dejetos de animais o aproveitamento anaeróbico sendo utilizado como matriz energética de geração de energia elétrica torna se então uma solução viável e sustentável para amenizar essa série de problemas. Logo abaixo foi apresentada uma série de estudos pesquisas sobre geração de biogás referente aos dejetos de animais.

Com relação ao aproveitamento dos dejetos da bovinocultura leiteira, em um artigo Costa (2015) realiza uma análise teórica da produção de energia elétrica com base em uma propriedade de 64 cabeças de gado. Nessa condição, o autor utiliza um valor médio tabelado de produção diária de 0,98 m³ de biogás por animal, totalizando 62,73 m³ diários. A partir dessa produção, é realizado o dimensionamento do biodigestor e do conjunto motor gerador. A abordagem realizada pelo autor não considera soluções tecnológicas específicas a biogás. Na composição do sistema para levantamento dos custos associados, o autor utiliza o motor veicular (Ciclo Otto) de 55 cv adaptado a biogás e um gerador de eletricidade com capacidade de geração de 44 kWh. Com custo estimado de investimento de R\$ 45.000,00 e considerando a tarifa de energia elétrica, para uma operação de 4 horas diárias do sistema o autor aponta o retorno de investimento em 8,6 anos e para uma

operação diária de 10 horas esse valor cai para 4 anos.

Uma abordagem teórica da produção do biogás em uma suinocultura é mostrada em um artigo publicado por Quinquilo (2015). A partir da contabilização dos dejetos de 1500 suínos (10.500 litros/dia) em uma granja localizada no estado do Paraná, o autor estima uma produção diária de 1.207,5 m³ de biogás. A tecnologia considerada na conversão energética consistia em um motor-gerador com capacidade de 60 kW/h e potência de 59 HP no valor de R\$ 80.000,00 (aquisição e instalação) e um biodigestor tubular no valor destinado de R\$ 50.000,00. A partir do custo anualizado do investimento no biodigestor e também partir da produção anual de biogás, o autor estima um custo de sua produção em R\$ 8,17/m³. Relacionando o custo de geração de energia elétrica à produção do biogás na propriedade e ao tempo de operação do gerador, o autor apresenta diferentes cenários. Para um gerador que opera duas horas diárias, o custo de produção é de 135,2 R\$/MWh com tempo de retorno do capital em 19,4 anos. Em um tempo de operação médio de 6 horas diárias, o custo de produção encontrado foi de 47,48 R\$/MWh com retorno de investimento de 3,97 anos. Operando durante doze horas diárias, o retorno poderá ocorrer em apenas 1,71 anos.

Casarin (2016) apresenta uma tese aprofundando a análise da geração de biogás no setor suinícola do estado de Minas Gerais e sua posterior utilização na geração de eletricidade. O autor desenvolve a princípio uma estimativa de 0,18 m³ de biogás produzido diariamente por cada suíno. Na composição dos diferentes valores de investimento em cada caso estudado pelo autor, foram adotados grupos gerador-motor do ciclo de Otto em diferentes potências, com tecnologia específica ao aproveitamento do biogás fornecido pela ERBR- Energias Renováveis. Considerando o custo de instalação do biodigestor de R\$ 150,00 por m³ da lagoa anaeróbica, o trabalho aborda diferentes cenários (granjas acompanhadas) de acordo com a capacidade de produção das granjas. Os indicadores econômicos foram estimados com base no investimento dos componentes do sistema, nos custos operacionais, nas receitas geradas e nos modelos tarifários e suas variações. Estendendo seus resultados a todo cenário mineiro, foi estimado um potencial de geração diário de 452.509,56 m³ de biogás. Contudo, em seu estudo base realizado por meio da coleta de dados em diferentes granjas produtoras, foi verificado que 1 em cada 2,14 animais estão localizados em granjas onde a viabilidade do projeto apresenta resultados positivos, gerando 0,22 kWh/dia.animal.

4.6.3 Geração de energia elétrica através do biogás proveniente dos resíduos sólidos urbanos

Segundo Reis (2003) a crescente demanda e aumento desacelerado de compra excessiva da sociedade tem trazido uma série de problemas cruciais para o tratamento dos Resíduos sólido urbano (RSU). A falta de gerenciamento e tratamento adequado para (RSU) é um problema o qual afeta diretamente toda sociedade e praticamente não escolhe lugar ou país, mas que se torna visível e premente nas grandes cidades e megalópoles. Atualmente existem diversos estudos para utilização do tratamento desses resíduos sendo que para esse trabalho utilizou estudos bibliográficos sobre o tratamento anaeróbico como fonte de geração de energia elétrica, o qual será apresentado abaixo.

Ainda de acordo com Castro (2018), quando se refere o biogás proveniente dos RSU pode prever uma geração de até 0,95 kWh/t processada, sendo que a grande maioria dos sistemas instalados gera de 0,4 a 0,95 kWh/t de capacidade. Naturalmente esta geração dependerá fortemente do poder calorífico do RSU processado. Entretanto, com a incineração controlada do RSU é também possível com 500 toneladas diárias, abastecer uma usina termelétrica com potência instalada de 16 MW, o que representa um potencial energético de cerca 0,7 MWh/t. Pode-se considerar que a incineração é capaz de proporcionar cerca 550 kWh/t de resíduo, e levando em conta que pode haver perdas na transmissão de até 5% do total produzido, este valor é de cerca de 523 kWh/t. A potencialidade da geração de energia de resíduos sólidos, está descrita na Tabela 8, abaixo.

Tabela 8 – Potência da geração por RSU no Brasil

ITEM	QUANTIDADE	UNIDADES	FONTE DE REFERÊNCIA
(A) RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS	59,07	M t/ano	(IBGE 2000)
(B) FATOR DE ENERGIA PRODUZIDA	523,0	kWh / tRSU	(EPA 2002)
(C) FATOR DE ENERGIA PRODUZIDA	769,2	kWh / tRSU	(TOLMASQUIM 2003)
(D) FATOR DE ENERGIA PRODUZIDA	0,5	k Wh / tRSU	(MENEZES 2000)

Fonte: Henriques (2004)

Tetraplan (2012) apresentam um estudo sobre a quantificação do potencial de geração de energia elétrica proveniente do gás metano gerado pelos resíduos de saneamento, enfatizando lixo e esgoto. Em relação ao aproveitamento do lixo, aos autores apresentam que 32,2% do descarte realizado no país ocorrem em aterros sanitários e aterros controlados, sendo esses mais adequados para implementação de projetos de geração de energia elétrica. Já vazadouros a céu aberto (lixões) devem ser adaptados e transformados em aterros controlados. Na seleção dos municípios analisados, os autores levaram em consideração dos dados populacionais (superior a 200 mil habitantes), a quantidade mínima de resíduos necessários para viabilizar empreendimentos do aproveitamento do biogás (volume mínimo de resíduos que geram no mínimo 300 kWh de energia). Após a coleta, compilação e análise dos dados de 56 localidades os autores obtiveram o potencial de geração do biogás usando-o como combustível nos motores ciclo Otto. Agregando o potencial de geração de todas as localidades, foi estimada uma potência instalada que soma 311 MW e a produção anual de biogás de 1.615.210.744 m³, o que daria pra abastecer a demanda energética de uma população com 5,6 milhões de habitantes. Por meio da análise da viabilidade econômica (investimentos, projetos, certificações) chegou-se a um custo médio de R\$ 323,00 por megawatt de potência. Conforme os autores destacam, a receita bruta agregada ao longo do período de 10 anos simulados chega a R\$ 7,40 bilhões de riquezas geradas. Uma importante síntese realizada pelos autores é destacada

na Tabela 9, trazendo um comparativo entre as tipologias de geração de energia elétrica renovável. Apesar do custo por MW gerado em aterros e lixões serem maiores que tecnologias convencionais como PCH e usinas de biomassa, essa se apresenta como alternativa em diferentes fatores, como aproveitamento da infraestrutura do aterro, redução de gases efeito estufa devido ao aproveitamento, geração de subprodutos, dentre outros. Além disso, frente à energia solar que tem sido amplamente difundida na atualidade, o aproveitamento do biogás também se mostra como alternativa da diversificação da matriz elétrica nacional.

Tabela 9 - Comparativo de custos de implementação de geração de eletricidade por tipologia de fontes renováveis

Tipologia Energética	R\$ / MW
Usinas de biomassa tradicional (principalmente bagaço) *	144
Pequena central hidrelétrica (PCH) *	142
Usinas eólicas *	131
Energia solar (painéis de fotocélula) **	500
Biogás de vazadouros a céu aberto (lixões) ***	381
Biogás de aterros sanitários ***	284
Biogás (média entre lixões e aterros sanitários) ***	323

* EPE (Empresa de Pesquisa Energética, vinculada ao Ministério de Minas e Energia) - Dados referentes ao Leilão de Fontes Alternativas de Energia Elétrica de 2010 (A-3 e Reserva), realizado dias 25 e 26 de agosto de 2010 (<http://www.epe.gov.br/leiloes/Paginas/default.aspx?CategoriaID=6695>).

** Estimado pelos autores com base na literatura disponível.

*** Dados oriundos da modelagem realizada pelo presente estudo.

Fonte: Tetraplan (2010)

Piñas (2016) analisam em seu artigo uma estimativa da quantidade de biogás e energia gerada da decomposição anaeróbica em um aterro sanitário na cidade de Três Corações (MG). Em princípio, o autor parte da análise do índice de geração *per capita* de RSU (0,75 kg/hab/dia) e para a projeção do biogás gerado ao longo dos anos é adotado uma taxa de crescimento populacional (1% anual).

O foco principal desse artigo consiste em comparar duas metodologias distintas da estimativa de geração do biogás, sendo elas o modelo de geração LandGEM (*Landfill gas emissions model*) da EPA (*Environmental Protection Agency*) e o modelo de geração Biogás da CETESB (*Companhia Ambiental do Estado de São Paulo*). Conforme a metodologia adotada pelos autores, os resultados obtidos mostram que a produção de biogás acumulada em 20 anos é de 26.075.960 m³ para

o modelo LandGEM e de 27.476.360 m³ para o modelo Biogás, com 128,68 GWh e 141,31 GWh de energia acumulada, respectivamente. Adotando o motor ciclo Otto na conversão energética do biogás para geração de eletricidade, com eficiência assumida de 33%, a potência média de geração apresentada pelos autores é de 242 kWe para o modelo LandGEM e 255 kWe com modelo Biogás. Além de evidenciar o potencial de uso do biogás em aterro, os autores também permitem a verificação da concordância entre dois modelos distintos da estimativa de produção do biogás.

4.6.4 Geração de energia elétrica através do biogás proveniente da Agricultura

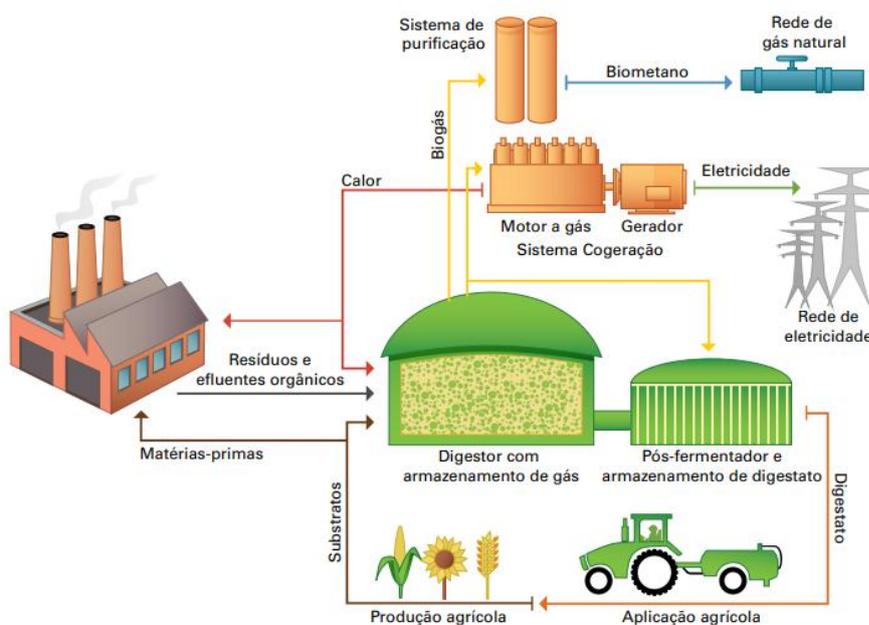
O setor agroindustrial tem participação de aproximadamente 5,9% no Produto Interno Bruto (PIB) do Brasil (EMBRAPA, 2019). Destaca-se, portanto sua grande importância nos processos produtivos no país e com isso a significativa demanda energética. Conforme a Fundação Estadual do Meio Ambiente (FEM) em seu Guia Técnico Ambiental de biogás na Agroindústria (2017), a implementação de empreendimentos de biogás se apresenta como oportunidade ímpar para incrementar significativamente o grau de sustentabilidade de setor. Tais empreendimentos têm potencial de promover a adequação ambiental da agroindústria, ampliar a produção de energia com base em fontes renováveis, ampliar a eficiência energética da indústria local e incrementar o PIB dos estados.

As agroindústrias em seus diferentes meios produtivos produzem constantemente efluentes e resíduos com elevado potencial de produção de biogás. Dentre as diversas atividades produtivas, pode-se citar: Produção de açúcar e etanol (vinhaça, torta de filtro e bagaço); Produção de refrigerantes (efluentes e restos de produção); Cervejarias (bagaço de malte, restos de filtro e efluentes); Produção de carne e açougues (efluentes, sangue, carne não comercializável e gordura); Produção de laticínios (soro de leite, lotes estragados e resíduos de separadores de gordura); Produção de Amidos e Farinhas de cereais, mandioca, batata (efluentes e restos de produção); Indústrias farmacêuticas (efluentes e resíduos com alto teor de substâncias biodegradáveis); Agricultura e pecuária (cascas, fezes, urinas, palha, hortaliças), dentre vários outros (FEM, 2017).

As etapas de aproveitamento do biogás na agroindústria indicadas em um fluxograma pode ser visto na Figura 22. A primeira consiste no gerenciamento do substrato (recepção, armazenamento, pré-tratamento, introdução no reator), a

segunda na geração do biogás por meio da biodigestão anaeróbica e as duas últimas estão relacionadas ao condicionamento e uso energético do biogás e gerenciamento do material digerido (pós-tratamento, armazenamento e disposição final). Conforme FEM (2017), as tecnologias mais usuais para o tratamento de resíduos efluentes agroindustriais são o Reator Contínuo de Mistura Completa (CSTR- *Continuous Stirred Tank Reactor*), Lagoas otimizadas e Reatores Anaeróbicos de Manta de Lodo e Fluxo Ascendente (UASB -*Upflow Anaerobic Sludge Blanket Reactor*).

Figura 22 - Fluxograma das etapas de aproveitamento energético do biogás nas agroindústrias

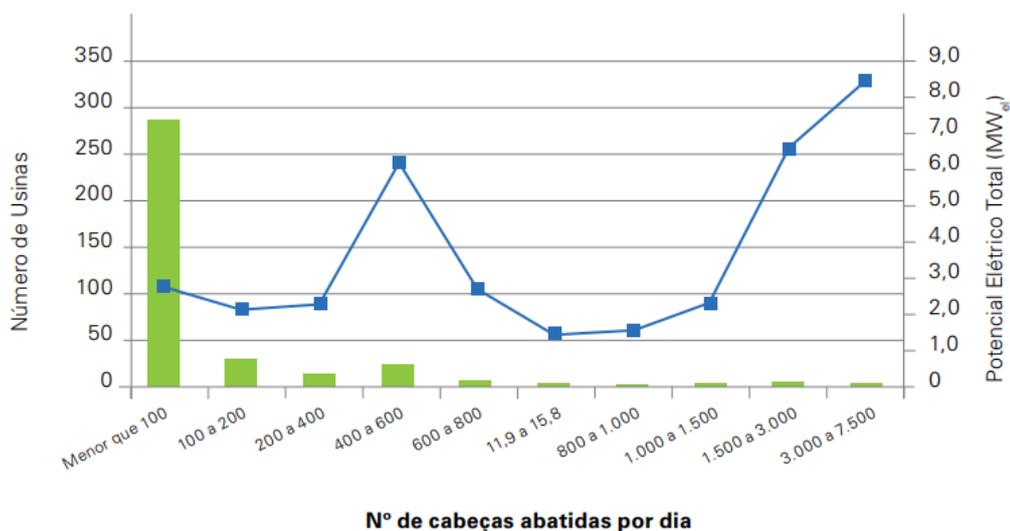


Fonte: Fundação Estadual do *et al.* (2017)

FEM (2017) aborda a geração de biogás na agroindústria para o estado de Minas Gerais com foco em resíduos e efluentes de abatedouro, destacando que possuem características bastante favoráveis à formação de biogás devido à capacidade de nutrientes, capacidade de tamponamento adequado ao crescimento microbiano e por serem gerados em temperaturas em torno de 20-30 C. No Gráfico 4 é sintetizado pelo autor o potencial de usinas a biogás no setor de abate. Na elaboração desse gráfico, a conversão da geração de potência elétrica instalada considerou o PCI do metano igual a 9,97 kWh/m³ e uma eficiência elétrica de 30%

para empreendimentos com potencial de até 500 kW e de 40% para empreendimentos com potencial superior a esse valor.

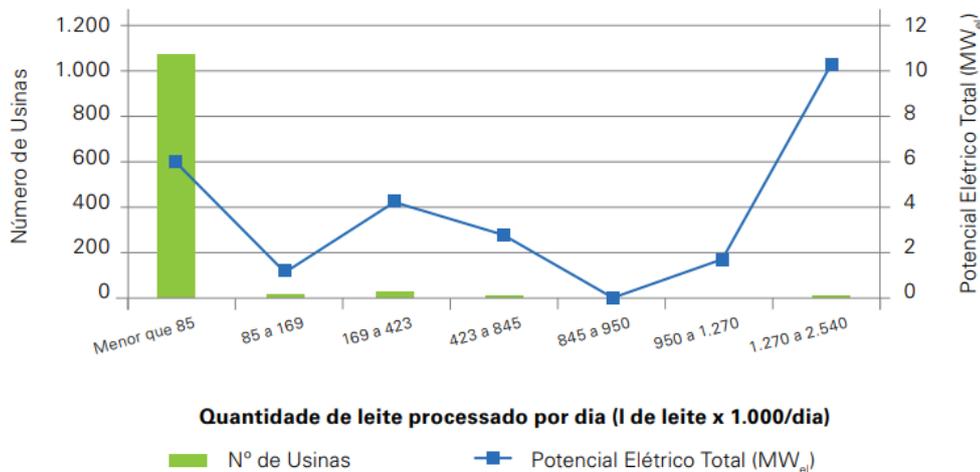
Gráfico 4 – Potencial de Usina de biogás no setor de abate.



Fonte: Fundação Estadual do *et al.* (2017)

FEM (2017) analisa ainda a geração de biogás a partir de laticínios situados no estado de Minas Gerais. O autor destaca que o estado é responsável por cerca de 30% da produção nacional. O biogás nesse setor pode ser obtido por meio dos produtos “brancos” (leite, cremes iogurte), produtos “amarelos” (manteiga e queijo) e produtos “especiais” (concentrado de leite ou soro e produtos lácteos desidratados). Em sua análise, os autores consideraram a taxa média de geração de efluentes de 4 litros por kg de leite processado, um valor médio de DQO (demanda química de oxigênio) de 4.427 mg/l com 88% de degradabilidade e uma taxa de geração de metano de 295 m³ por tonelada de DQO removida. O potencial levantado pelo autor de implementação de usinas a biogás no setor laticínio no estado é exibido no Gráfico 5.

Gráfico 5 - Potencial de usinas de biogás no setor de laticínios em Minas Gerais



Fonte: Fundação Estadual do *et al.* (2017)

4.6.5 Comparativo de aplicabilidade do biogás

Conforme discutido nas seções anteriores, existem diferentes formas de obtenção do biogás. A definição do sistema que melhor se adéqua a cada caso deve considerar no mínimo as características particulares do setor produtivo em questão. Dentro dessa análise encontra-se a escolha das formas de conversão do biogás em eletricidade. Verificou-se que muitos autores assumem em projeto a eficiência elétrica de cada processo de conversão, ou seja, adotam valores disponibilizados por fabricantes de acordo com as diferentes tecnologias voltadas ao aproveitamento do biogás.

Dentre os casos abordados, viu-se que os motores de ignição por centelha (Ciclo Otto) são as máquinas térmicas mais utilizadas, desde empreendimentos de pequeno porte até de grande porte. Contudo, pôde-se evidenciar que sua utilização ocorre em aplicações onde não há um ciclo de cogeração e dessa forma a eficiência no processo de conversão do biogás em eletricidade nesses tipos de máquinas gira em torno de 30%. Já para o caso das ETE's que demandam de calor em seu processo operação, a utilização de um ciclo de cogeração que emprega o uso turbinas a vapor permite um aumento de eficiência superior a 70%, além também de reduzir os custos com a compra de eletricidade que era destinada a geração de calor. Operações agroindustriais ou até mesmo as rurais (fazendas) podem utilizar

turbinas a gás, contudo viu-se em estudo que por demandarem de uma infraestrutura mais cara podem diminuir a atratividade do investimento.

Em relação ao aproveitamento dos esgotos, Sadhukhan (2014) apresenta um estudo que tem por objetivo oferecer as indústrias uma análise comparativa das tecnologias disponíveis e adaptáveis de aproveitamento do biogás. O autor realiza um comparativo entre as topologias de Motores de Combustão Interna (MCI) de ciclo Otto e ciclo Diesel, Célula Combustível a Membrana Trocadora de Prótons (PEMFC- *Proton Exchange Membrane Fuel Cell*), Microturbinas a Gás (MTG), Turbina a Gás (TG) e uma SOFC (Solid Oxid Fuel Cells) combinada com uma turbina a gás (TG). O autor analisa a geração para a mesma quantidade de biogás em cada topologia cujo valor base foi equivalente a 11340 MJ ou 3150 kW, estando os resultados apresentados na Tabela 10.

Tabela 10 - Geração de eletricidade e calor a parti de 11340 MJ de biogás

	Eletricidad e(kWh)	Eficiência elétrica (%)	Calor (kWh)	Eficiência térmica (%)
Proton exchange membrane fuel cell – PEMFC – 2 kWe	1008,0	32,0	1732,5	55,0
Solid oxide fuel fell (SOFC) – 125 kWe	1480,6	47,0	1039,5	33,0
SOFC - TG – 180 kWe	1826,9	57,9	693,1	22,00
Micro turbina a gás –100 kWe	945,0	30,0	1417,5	45,0
Motor Combustão – Ciclo Diesel	820,0	26,1	1396,1	44,3
Motor Combustão – Ciclo Otto	972,78	30,9	1587,2	50,4

Fonte: Adaptado de Sadhukan *et al.* (2014)

A partir do estudo de Sadhukhan (2014) apresentado na Tabela 10, verifica-se que a combinação de uma MTG à SOFC obteve-se uma geração de 1826,9 kW com eficiência de 57,9%, sendo ela bem superior comparada ao uso do MTG que gerou 945 kW devido a eficiência de 30%. Considerando que o biogás contém determinada energia fixa, quanto maior a geração de eletricidade, menor é o valor de energia térmica gerada. De acordo com a tabela, percebe-se que a quantidade de eletricidade gerada por uma MTG é aproximadamente igual a um MCI de ciclo Otto.

Durante a pesquisa verificou-se a carência de sistemas a biogás no Brasil. Grande parte dos artigos e teses consultadas realizava análises teóricas em estudos de casos na determinação do potencial de geração de eletricidade. Com isso, não se

verificou o caráter prático das instalações, como eficiência global em operação, descrição dos processos termodinâmicos, correspondência de geração entre a teoria de projeto e o funcionamento real, etc. Tais déficits de informações podem ser compreendidos quando se verifica a quantidade de plantas a biogás instaladas no Brasil, retratado na Tabela 11 do Anexo C. Constata-se que das 22 plantas nacionais de geração a biogás, a maioria é destinada a agricultura, aterros sanitários e lodo de esgoto que juntas somam 86,4%. Comparado a Alemanha que é o maior país que utiliza o aproveitamento do biogás, o Brasil representa ínfimos 0,2% do seu total de instalações.

5 CONCLUSÃO

Para este trabalho de conclusão de curso, foi proposta a apresentação de pesquisas relacionadas a análise técnicas de geração da energia elétrica proveniente do biogás como fonte de matriz energética, apresentando a mesma como uma solução viável e sustentável para geração de energia elétrica.

A utilização de compostos orgânicos aeróbicos (biogás) para a geração de energia elétrica explanada neste trabalho mostra um estudo detalhado sobre geração de energia elétrica, e apresenta benefícios ao meio ambiente e à sociedade com o aproveitamento de resíduos, que não tinham tratamento adequado para sua reutilização.

Através deste trabalho, foi possível identificar o alto poder calórico e energético do biogás, que se apresenta de diversas maneiras como forma sustentável e renovável para geração de energia elétrica.

Embora a tecnologia envolvendo o biogás como fonte de geração de energia elétrica apresenta excelentes benefícios, como já citado no texto, verificou-se que ainda existe alta ausência em relação a seu aproveitamento.

Durante a pesquisa, notou-se a carência de sistemas de geração a biogás no Brasil. Grande parte dos artigos e teses consultados realizavam análises teóricas em estudos de caso na determinação do potencial de geração de eletricidade. Com isso, não se atentou para o caráter prático das instalações, como eficiência global em operação, descrição dos processos termodinâmicos, correspondência de geração entre a teoria de projeto e o funcionamento real, etc.

Dentre as tecnologias utilizadas para a conversão do biogás em energia elétrica, considerou-se que os motores de ignição por centelha (Ciclo Otto) são as máquinas térmicas mais utilizadas, desde os empreendimentos de pequeno porte até grandes. Contudo, pôde-se evidenciar que sua utilização ocorre em aplicações onde não há um ciclo de cogeração e, dessa forma, a eficiência no processo de conversão do biogás em eletricidade nesses tipos de máquina, gira em torno de 30%. Já para o caso das ETE's, que demandam calor em seu processo operação, a utilização de um ciclo de cogeração que emprega o uso turbinas a vapor, permite um aumento de eficiência superior a 70%, além de reduzir os custos com a compra de eletricidade que era destinada à geração de calor.

Para compreensão dos modelos de funcionamento das tecnologias, foram extraídos da literatura os principais exemplos do uso do biogás aplicado em diferentes pontos; sendo eles: RSU, ETE's, dejetos de animais, agricultura, apresentando, de modo geral, o potencial calórico e energético de cada um. Os modelos dos dejetos de animais e agricultura na grande maioria das vezes se utilizam dos motores ignição por centelha (Ciclo Otto) devido seu baixo custo de implementação bem como também e a facilidade de instalação. Todavia pelo fato de não se aproveitar a cogeração seu potencial de energia é bastante reduzido, diferente dos RSU e ETE's. A geração por esses processos, na maioria, das vezes é utilizada por ciclos de cogeração empregados com uso de turbinas, com alto aproveitamento calórico e energético.

Estudos realizados de artigos e livros conceituados desse trabalho trouxeram à tona diferentes e importantes conclusões através do biogás, como por exemplo a matriz energética que ainda é pouco aproveitada. O alto poder de ganho em termos de aprendizagem deixa como ponto básico a necessidade da continuação de novos estudos, uma vez que novas gerações e tecnologias far-se-ão presentes.

REFERÊNCIAS

Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL). **Geração:** Geração distribuída ultrapassa 20 mil conexões. 2018. Disponível em: < http://www.aneel.gov.br/sala-de-imprensa-exibicao/-/asset_publisher/XGPXSqdMFHrE/content/geracao-distribuida-ultrapassa-20-mil-conexoes/656877>. Acesso em:2019.

Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL). **Micro e minigeração distribuída.** Sistema de Compensação de Energia Elétrica. Brasília: Centro de Documentação– Cedoc, 2014.

Agência Nacional de Energia Elétrica (Brasil). **Atlas de energia elétrica do Brasil.** – Brasília: ANEEL, 2002. 153 p.

ALBARRACIN, A. L. T. **Biogás oriundo de resíduos como vetor energético no Brasil.** Dissertação (mestrado) – Curso de engenharia mecânica, Universidade estadual de Campinas, Campinas, 2016.

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

ARAÚJO, A. P. C. **Produção de biogás a partir de resíduos orgânicos utilizando biodigestor anaeróbico.** Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Curso de Engenharia Química, Faculdade de Engenharia Química, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2017.

BARROS, D. **Cogeração de Energia com Biogás a partir do lodo biológico.** 10º Congresso sobre Geração Distribuída e Energia no Meio Rural. Universidade de São Paulo (2015).

BENINCASA, M.; ORTOLANI; A. F.; LUCAS JR, J. **Biodigestores convencionais.** Departamento de Engenharia Rural da Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias. UNESP, Campus de Jaboticabal, 1990.

BILOTTA, P.; ROSS, B. Z. L. **Estimativa de geração de energia e emissão evitada de gás de efeito estufa na recuperação de biogás produzido em estação de tratamento de esgotos.** Engenharia Sanitária e Ambiental, Rio de Janeiro, v. 21, n. 21, p.275-282, jan. 2016.

BORGNAKKE, C.; SONNTAG, R. E. **Fundamentos da termodinâmica**. [Fundamentals of classical thermodynamics, 8th ed. (inglês)]. Tradução de Roberto de Aguiar Peixoto. 8 ed. reimpr. São Paulo: Blucher, 2013. 728 p.

CASARIN, M. A. **Microgeração distribuída de energia elétrica a partir do biogás de dejetos suínos: uma contribuição para a sustentabilidade da suinocultura**. Dissertação (Mestrado) - Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico, Florianópolis: 2016.

CASTRO, G. A. **Análise de viabilidade de um sistema de trigeriação com energia proveniente de biogás**. 2018. Dissertação (Mestrado) – Curso de Engenharia Mecânica, Faculdade de Engenharia da universidade do Porto, Porto, 2018.

ÇENGEL, Y. A.; BOLES M. A. **Termodinâmica**. Paulo Mauricio Costa Gomes (trad). 7 ed. Porto Alegre: AMGH 2013.

CHAPMAN, S. J. **Fundamento de máquinas elétricas**. Bae Systems Australia: AMGH Editora Ltda., 2013.

COLDEBELLA, A. **The viability of using Biogas from bovine culture and swine culture to the generation of electric power and irrigation for rural proprietes**. 2006. 74 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Cascavel, 2006.

COSTA, D. F. **Geração de energia elétrica a partir do biogás do tratamento de esgoto**. Dissertação (Mestrado em Energia) – Universidade de São Paulo, São Paulo. 2006.

COSTA, K. C. **Viabilidade de geração de energia elétrica com biogás em propriedades rurais de exploração leiteira no Tocantins**. Jornada de Iniciação Científica e Expansão: Instituto federal do Tocantins (2015).

CUNHA, I. O. **Otimização de ciclo de turbina a vapor com três extrações utilizando o programa IPSEPRO**. Projeto Final (Graduação) – Curso de Engenharia Mecânica, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio de Janeiro - DEM/POLI/UFRJ. 2016.

DE SOUZA, S. N. M. **Manual de geração de energia elétrica a partir do biogás no meio rural**. Dissertação (Mestrado) Curso de Engenharia de Energia na Agricultura, Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Cascavel, 2016.

DEGANUTTI, R; PALHACI, M.C.J; ROSSI, M;TAVARES, R **Biodigestores rurais: modelo indiano, chinês e batelada**. São Paulo: 2002. Disponível, em:<http://www.proceedings.scielo.br/scielo.php?pid=MSC000000022002000100031&script=sci_arttext&tlng=pt>. Acesso em: 08 maio 2019.

DUARTE, F. **Entenda qual tipo de biodigestor é a melhor solução para seus resíduos**. emasjr, 22 de abril de 2018. Disponível em: <<https://emasjr.com.br/2018/04/22/tipos-biodigestor/>>. Acesso em:2019

FUNDAÇÃO ESTADUAL DO MEIO AMBIENTE-FEM. **Guia técnico ambiental de biogás na agroindústria**. 160p. 2015. Disponível em <http://www.feam.br/images/stories/2015/PRODUCAO_SUSATENTAVEL/GUIAS-TECNICOS-AMBIENTAIS/Guia_Biog%C3%A1s.pdf > Acesso em: 24/06/2019.

FONSECA, F. S. T; ARAÚJO, A. R. A; HENDGES, T. L. **ANÁLISE DE VIABILIDADE ECONÔMICA DE BIODIGESTORES NA ATIVIDADE SUINÍCOLA NA CIDADE DE BALSAS-MA: UM ESTUDO DE CASO**. In: SOBER 47 CONGRESSO SOCIEDADE BRASILEIRA DE ECONOMIA, ADMINISTRAÇÃO E SOCIOLOGIA RURAL, 47., 2009, Porto Alegre. Apresentação Oral-Agropecuária, Meio-Ambiente, e Desenvolvimento Sustentável. Balsas: Sociedade Brasileira de Economia, Administração e Sociologia Rural, 2009. pg. 1 - 19

GAMA P. H. R. P; SILVA, M. P. R; RODRIGUES, M. A.O; LIMA C. G; SERGIO P. R; PALHA, L. A. P. F; OLIVEIRA, P H. C; FLORES, E. M; CAIRES, T. D.C; RODRIGUES, E. A; SILVA H. P; RAMOS, L. A. S; RAMOS, D. S.; SILVA, E.J; LUNA, J. M. **Arranjos Técnicos e Comerciais para Inserção de Geração de Energia Elétrica a Partir do Biogás de Resíduo-Efluentes Líquidos dentro de um Modelo com Biodigestores Dispersos**. Programa de Pesquisa e Desenvolvimento Tecnológico do Setor de Energia Elétrica regulado pela ANEEL e consta dos Anais do VIII Congresso de Inovação Tecnológica em Energia Elétrica (VIII CITENEL), Salvador /BA, 17 a 19 de agosto de 2015.

HECK, N. C. **Termodinâmica para processos da pirometalurgia – método progressivo**. NTCm / UFRGS, 2009.

HERCULANO, M. C. R. **Biodigestores: cartilha de manejo**. Boletim Técnico IFTM, p. 14-19, 2016.

Instituto Brasileiro de Geografia e estatística (IBGE). **PESQUISA nacional de saneamento básico 2008**. Rio de Janeiro: IBGE, 2010. 218 p.

International Energy Agency (iea). **Key world energy statistics**: Also available on smartphones and tablets. 2017.

JOVANINI JR, E.; KURAUCHI, S. K. **Projeto de uma microturbina para potência inferior a 5 kW**. Projeto Final (Graduação) – Curso Engenharia Mecânica. Universidade de São Paulo, Escola Politécnica, Departamento de Engenharia Mecânica.2007.

JÚNIOR, J. L.; SOUZA, C. F. **Construção e Operação de Biodigestores**. Viçosa-MG, CTP, 2009.

KARLSSON, T; KONRAD, O; LUMI, M; SCHMEIER, N.P; MARDER, M; CASARIL, C.E; FERNANDES, F; ALBARI,G. P. **Manual básico de biogás**. Lajeado: Ed. da UNIVATES, 2014.

KUNZ, A.; PAULILLO, G. **Curso de Atualização em energias do biogás**. Módulo II - Linhas de base para a produção e conversão de energia do biogás. [S.l]. [s.n]. [2013]. 89

LORA, E.E.D.S.; NASCIMENTO M.A.R.D. **Geração Termelétrica** –Planejamento, Projeto e Operação, 2 ed. Editora Cidade, 2004.

MACIEL, A. A.; CRUZ, K. S. T. C. **ANÁLISE DA GERAÇÃO DO BIOGÁS DE UMA PEQUENA CENTRAL TERMOELÉTRICA INSTALADA EM UMA ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE EFLUENTES NO MUNICÍPIO DE SABARÁ**, MG. NBC-Periódico Científico do Núcleo de Biociências, v. 5, n. 10, p. 16-24, 2016.

MEDINA, M. N.; NISENBAUM, M. A. **A Primeira Lei da Termodinâmica**. PUC Rio, 2009. Disponível em:<http://web.ccead.puc-rio.br/condigital/mvsl/Sala%20de%20Leitura/conteudos/A_primeira_lei_termodinamica.pdf>. Acesso em: 23 abr. 2019

MILANEZ, A.M; GUIMARÃES D. D; SILVA, G. B. S. M; SOUZA, J. A. P.S; LEMOS M. L. F. **Biogás de resíduos agroindustriais**: panorama e perspectivas. BNDES Setorial 47, p. 221-276, março de 2018.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA (MME). **Balanco Energético Nacional: Relatório Síntese**-ano base 2014. Brasília: MME/EPE, 2015.

OLIVEIRA, D. E. P.; SANTANA, J. C. C.; MEDEIROS, M. F. **Viabilidade econômica e ambiental na cogeração de energia a partir de resíduos agrícolas**: estudo de caso de um município do estado de minas gerais do brasil. Anais do VII SINGEP – São Paulo – SP – Brasil – 22 e 23/10/2018.

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. Programa Interunidades de Pós-Graduação em Energia (PIPGE) do Instituto de Eletrotécnica e Energia (IEE) da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006.

PIÑAS, J. A. V. **Aterros sanitários para geração de energia elétrica a partir da produção de biogás no Brasil: comparação dos modelos LandGEM (EPA) e Biogás (Cetesb)**. Revista Brasileira de Estudos de População, v. 33, n. 1, p. 175-188, 2016.

PINHEIRO, F. **Eficiência energética de uma unidade microgeração geração de energia elétrica a parti do biogás da suinocultura**. 2015. Trabalho Conclusão de Curso (Engenharia) - Dissertação, Cascavel Paraná, 2015

POLÍTICA NACIONAL DE RESÍDUOS SÓLIDOS. Lei no. 12.305/2010. Disponível em www.presidencia.gov.br. Acessado em 06/03/2019.

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

QUINQUIOLO, P. F. **Análise de Custos de Implementação de um Moto-Gerador Movido a Biogás- Estudo de Casso**. XLIV Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola – CONBEA 2015.

REIS, L. B. **Geração de Energia Elétrica**: tecnologia, inserção ambiental, planejamento, operação e análise de viabilidade. 3. ed. Barueri: Manole, 2003. ISBN: 85-204-1536-9.

ROSA, A.P; LOBATO, L. C.S; BORGE, J.M ;Melo,G. C. B; CHERNICHARO, C .A .L Potencial energético e alternativas para o aproveitamento do biogás e lodo de reatores UASB: estudo de caso Estação de tratamento de efluentes Laboreaux (Itabira). **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 21, p. 315-328, 2016. ISSN 1413-4152. <http://dx.doi.org/10.1590/s1413-41522016123321>.

SADHUKHAN, J. Distributed and micro-generation from biogas and agricultural application of sewage sludge: Comparative environmental performance analysis using life cycle approaches. *Applied Energy*, v. 122, p. 196–206, 1 jun. 2014.

SALOMON, K. R. **Avaliação técnico-econômica e ambiental da utilização do biogás proveniente da biodigestão da vinhaça em tecnologias para geração de eletricidade**. 2007. 219 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2007.

SANTOS, I. F. S.; FILHO, G.L.T.; BARROS, R.M. (2015). **Análises econômicas, de sensibilidade e elasticidade em projetos de energias renováveis no Brasil**. *Revista Brasileira de Energia*, v. 21, nº 2, 2015.

SILVA, C. A. B. V. **Limpeza e Purificação de Biogás**. 2009. 91f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) Obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica apresentada à Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro, Vila Real, Portugal

SILVA, F. P. **Eficiência energética de uma unidade de microgeração de energia elétrica a partir do biogás da suinocultura**. 2015.

SOUSA, F. J. R. **A Geração Termelétrica: A contribuição das Térmicas a Gás Natural Liquefeito**. 146 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Planejamento de Sistemas Energéticos, Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2009.

SOUZA, S. N. M; PEREIRA, W. C; NOGUEIRA, C. E. C; PAVAN, A. A; SORD, A. **Custo da eletricidade gerada em conjunto motor gerador utilizando biogás da suinocultura**.

SUZUKI, A. B. P. **Uso de biogás em motores de combustão interna**. *Revista Brasileira de Tecnologia Aplicada nas Ciências Agrárias*, Guarapuava-PR, v.4, n.1, p.221–237, 2011.

TETRAPAN, A. **Estudo sobre o Potencial de Geração de Energia a partir de Resíduos de Saneamento (lixo, esgoto), visando incrementar o uso de biogás como fonte alternativa de energia renovável**. 2010.

TOLMASQUIM, M. T. **Energia Termelétrica: Gás Natural, Biomassa, Carvão, Nuclear**. Rio de Janeiro: EPE, 2016.

UBERTI, V. A.; INDRUSIAK, M. L. S. **Modelagem e estudo de rendimento termodinâmico de ciclos combinados de geração termelétrica.** Revista Liberato, Novo Hamburgo, v. 16, n. 25, p. 07-20, jan./jun. 2015.

WANKE, B. S. L. **Análise de Ciclos Combinados com Diferentes Fluidos.** 74 f. Monografia (graduação) - Curso de Engenharia Mecânica, Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2019.

WEREKO-BROBBY, C. Y., HAGEN, E.B. **Biomass conversion and technology.** New York: John Wiley & Sons, 2000

ANEXO A

Quadro 1 - Análise comparativa das principais alternativas para uso do biogás para geração combinada de eletricidade e calor.

ALTERNATIVA	VANTAGENS	DESVANTAGENS
Motores de combustão interna	<p>Custo de aquisição moderado.</p> <p>Tecnologia madura e largamente aplicada para a geração de energia a partir do biogás, especialmente em instalações com potência de 800 kW. Nos EUA, cerca de 60% dos projetos de geração combinada de eletricidade e calor, a partir de biogás de aterros sanitários, utilizam motores de combustão interna (dados de 2003).</p> <p>Grande diversidade de motores estacionários disponíveis no mercado, cobrindo uma grande faixa de aplicações (5 kW até 5 MW) e ciclos de operação.</p> <p>Apresenta partida rápida, operação estável e são usualmente bastante confiáveis.</p> <p>Normalmente operados com gás natural, mas podem ser ajustados para operar com propano ou biogás.</p> <p>Grande potencial de recuperação de energia (elétrica + térmica).</p>	<p>Mais sujeitos a corrosão, embora a utilização de óleos lubrificantes possibilite alguma proteção contra os produtos ácidos da combustão.</p>
Turbinas a gás	<p>Menos sujeitas à corrosão que os motores de combustão interna.</p> <p>A elevada temperatura dos gases de exaustão possibilita a geração de vapor em alta pressão e elevada temperatura (480°C), ou a aplicação direta em processos industriais de aquecimento e de secagem.</p> <p>Em um ciclo combinado de turbina a gás e a vapor, os gases de exaustão proveniente da turbina a gás alimentam uma caldeira que fornece vapor para o funcionamento da turbina a vapor, dessa forma existem duas fontes de energia elétrica, sendo a eficiência da ordem de 60 a 70%.</p>	<p>Elevado custo de aquisição, em função da necessidade de compressão elevada do gás.</p> <p>Elevado custo operacional, em função da necessidade de compressão elevada do gás.</p> <p>Demanda de gás com qualidade consistente.</p> <p>Demanda de elevada pressão de gás na entrada.</p>
Microturbinas	<p>Apresentam vantagens em relação às outras alternativas de geração de energia a partir do biogás nos seguintes casos: baixa produção de biogás; biogás com baixo teor de metano; preocupação com emissão de NO_x; quando da utilização da eletricidade no próprio local de geração; em substituição à energia comprada da concessionária; quando o suprimento de eletricidade é não confiável e de preço elevado; quando houver necessidade de água quente no próprio local ou nas imediações.</p> <p>Equipamentos portáteis e fáceis de serem modulados (uma ou múltiplas turbinas), para se adequar à produção de biogás e às necessidades locais.</p> <p>Equipamentos compactos e poucas partes móveis, requerendo, dessa forma, poucos cuidados com a operação e a manutenção. Baixas emissões de NO_x, usualmente dez vezes inferiores às dos motores de combustão interna de melhor desempenho, e também inferiores às emitidas por queimadores (<i>flares</i>).</p> <p>Capazes de operar com biogás de baixo conteúdo de metano (35 ou até mesmo 30%).</p> <p>Configuração padrão do equipamento usualmente oferece um gerador de água quente (~95°C) a partir do calor desprendido no exaustor.</p>	<p>Eficiência inferior a motores de combustão interna e outros tipos de turbinas. Consomem cerca de 30% a mais de combustível por kWh gerado.</p> <p>Susceptível à contaminação por siloxano. Alimentação com biogás de aterro usualmente requer nível mais elevado de pré-tratamento que o requerido por turbinas convencionais e outras formas de geração de energia elétrica.</p> <p>Atualmente, poucos compressores de baixa vazão e elevada pressão encontram-se disponíveis para atender aos requisitos das microturbinas sem a necessidade de adaptações caras.</p> <p>Poucas informações disponíveis sobre a confiabilidade a longo prazo e sobre os custos de operação e manutenção de microturbinas a biogás.</p>

ANEXO B

PARÂMETRO	PRINCIPAIS ALTERNATIVAS		
	MOTORES DE COMBUSTÃO INTERNA	TURBINAS	MICROTURBINAS
Faixa de potência disponível no mercado (kW)	5 - 5.000	500 - 250.000	30 - 1000
Faixa usual de aplicação (kW)	800 - 3000	> 3.000	<1.000
Custo de implantação (US\$.kW ⁻¹)	900 - 1000	1000 - 1800	4000 - 5000
Custos de O&M* (US\$.kWh ⁻¹)	0,009 - 0,010	0,006 - 0,010	0,15 - 0,20
Taxa de geração de eletricidade e calor (kWh consumido por kWh gerado)	2,8 - 3,0	3,7 - 4,6	4,1 - 4,7
Eficiência elétrica (%)	33 - 36	22 - 27	22 - 33
Consumo de combustível (kWh.h ⁻¹ por kW instalado)	2,8 - 3,0	3,7 - 4,6	3,3 - 7,5
Pressão de alimentação do gás (atm)	< 0,2 - 3,0	6,5 - 11	3,7 - 5,8
Produção de gás de exaustão (kg.h ⁻¹)	6 - 7	15 - 20	23 - 37
Temperatura do gás de exaustão (°C)	360 - 470	510	280 - 310
Recuperação total de calor (kWh por kW instalado)	1,10 - 1,28	1,56 - 2,08	3,2 - 3,6
Pressão de alimentação do gás (atm)	< 0,2 - 3,0	6,5 - 11	3,7 - 5,8
Produção de gás de exaustão (kg.h ⁻¹)	6 - 7	15 - 20	23 - 37
Temperatura do gás de exaustão (°C)	360 - 470	510	280 - 310
Recuperação total de calor (kWh por kW instalado)	1,10 - 1,28	1,56 - 2,08	3,2 - 3,6
Eficiência total de geração de eletricidade e calor (%)	75 - 76	68 - 69	60 - 73
Emissões de NOx** (ppm)	250 - 3000	35 - 50	<9

ANEXO C

Tabela 11 – Tipos de plantas a biogás de alguns países

# Plantas	Brasil	Dinamarca	Finlândia	França	Irlanda	Noruega	Coreia	Suécia	Suíça	Holanda	Reino Unido	Média	Alemanha
Lodo de esgoto	5	65	15	60	14	25	24	135	463	82	146	94	1.400
Sobras orgânicas	1	-	9	11	-	11	25	21	26	11	66	16	95
Agricultura	8	82	8	105	8	4	8	26	89	105	53	45	7.800
Industrial	2	5	2	80	-	3	-	5	22	13	-	13	250
Aterros sanitários	6	30	39	80	8	85	21	55	-	41	345	71	400
Total	22	182	73	336	30	128	78	242	600	252	610	240	9.945

% # Plantas	Brasil	Dinamarca	Finlândia	França	Irlanda	Noruega	Coreia	Suécia	Suíça	Holanda	Reino Unido	Média	Alemanha
Lodo de esgoto	22,7	35,7	20,5	17,9	46,7	19,5	30,8	55,8	77,2	32,5	23,9	34,8	14,1
Sobras orgânicas	4,5	-	12,3	3,3	-	8,6	32,1	8,7	4,3	4,4	10,8	8,1	1,0
Agricultura	36,4	45,1	11,0	31,3	26,7	3,1	10,3	10,7	14,8	41,7	8,7	21,8	78,4
Industrial	9,1	2,7	2,7	23,8	-	2,3	-	2,1	3,7	5,2	-	4,7	2,5
Aterros sanitários	27,3	16,5	53,4	23,8	26,7	66,4	26,9	22,7	-	16,3	56,6	30,6	4,0
Total	100,0												

Fonte: Milanez et al. (2018)