



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

“JÚLIO DE MESQUITA FILHO”

FACULDADE DE ENGENHARIA

CAMPUS DE BAURU

MARCIO YUKIO HIRANO

**GERAÇÃO DE ENERGIA POR MICROTURBINA ALIMENTADA À
BIOGÁS EM UMA PROPRIEDADE RURAL - ESTUDO DE CASO**

BAURU – SÃO PAULO

2015

MARCIO YUKIO HIRANO

**GERAÇÃO DE ENERGIA POR MICROTURBINA ALIMENTADA À
BIOGÁS EM UMA PROPRIEDADE RURAL - ESTUDO DE CASO**

Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia da Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, *Campus* de Bauru, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação da Engenharia Mecânica, para obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Celso Luiz da Silva

BAURU – SÃO PAULO

2015

Hirano, Marcio Yukio.

Geração de energia por microturbina alimentada à
biogás em uma propriedade rural : estudo de caso /
Marcio Yukio Hirano, 2015

107 f. : il.

Orientador: Celso Luiz da Silva

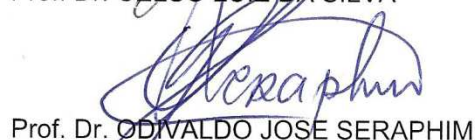
Dissertação (Mestrado)-Universidade Estadual
Paulista. Faculdade de Engenharia, Bauru, 2015

1. Microturbina. 2. Biogás. 3. Aproveitamento
Energético. I. Universidade Estadual Paulista.
Faculdade de Engenharia. II. Título.

ATA DA DEFESA PÚBLICA DA DISSERTAÇÃO DE Mestrado DE MARCIO YUKIO HIRANO, DISCENTE DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA, DO(A) FACULDADE DE ENGENHARIA DE BAURU.

Aos 17 dias do mês de julho do ano de 2015, às 09:00 horas, no(a) Anfiteatro da Seção Técnica de Pós-graduação, da Faculdade de Engenharia de Bauru, reuniu-se a Comissão Examinadora da Defesa Pública, composta pelos seguintes membros: Prof. Dr. CELSO LUIZ DA SILVA do(a) Departamento de Engenharia Mecânica / Faculdade de Engenharia de Bauru, Prof. Dr. ODIVALDO JOSE SERAPHIM do(a) Dep de Engenharia Rural / Faculdade de Ciências Agrônomicas de Botucatu, Prof. Dr. DÉLSON LUIZ MÓDOLO do(a) Departamento de Engenharia Mecânica / Faculdade de Engenharia de Bauru, sob a presidência do primeiro, a fim de proceder a arguição pública da DISSERTAÇÃO DE Mestrado de MARCIO YUKIO HIRANO, intitulado "BIOGÁS GERADO DE DEJETOS DE GADO CONFINADO COMO FONTE DE ENERGIA RENOVÁVEL EM PROPRIEDADES RURAIS". Após a exposição, o discente foi arguido oralmente pelos membros da Comissão Examinadora, tendo recebido o conceito final: APROVADO. Nada mais havendo, foi lavrada a presente ata, que, após lida e aprovada, foi assinada pelos membros da Comissão Examinadora.


Prof. Dr. CELSO LUIZ DA SILVA


Prof. Dr. ODIVALDO JOSE SERAPHIM


Prof. Dr. DÉLSON LUIZ MÓDOLO

PROPOSTA DE ALTERAÇÃO DO TÍTULO

A BANCA EXAMINADORA PROPÕE A ALTERAÇÃO DO TÍTULO DO TRABALHO DO ALUNO:
MARCIO YUKIO HIRANO

DE: "BIOGÁS GERADO DE DEJETOS DE GADO CONFINADO COMO FONTE DE ENERGIA
RENOVÁVEL EM PROPRIEDADES RURAIS"

PARA:

GERAÇÃO de Energia por Microturbina
Alimentada a Biogás em uma Propriedade
Rural - Estudo de Caso.

Bauru, 17 de julho de 2015


Prof. Dr. Celso Luiz da Silva
Orientador

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus pais, Orlando Eúti Hirano e Luíza H. Saruwataru Hirano, que estiveram sempre comigo, ensinando-me, apoiando-me, e acreditando em meu potencial.

Agradeço também a todos os professores da Engenharia Mecânica que me acompanharam durante a graduação e a pós-graduação, e que foram tão importantes na minha vida acadêmica, em especial ao Prof. Dr. Celso Luiz da Silva pelo convívio, pela compreensão, pela paciência, pela amizade, pelos conhecimentos repassados e pelo apoio para a realização deste trabalho.

Aos amigos e colegas, pelo incentivo e pelo apoio constante, em especial a minha amiga Aline A. Camargo, que também entrou nesta jornada de conhecimentos, e sempre me apoiou nos momentos difíceis.

Agradeço também aos proprietários e funcionários do Sítio Vovó Cida, que gentilmente permitiram conhecer a propriedade e contribuíram na obtenção de dados para este trabalho.

Agradeço também a CAPES pelo apoio científico e financeiro que viabilizaram a realização deste trabalho.

"Trabalhar com sustentabilidade é plantar um presente que garanta a subsistência das novas gerações num planeta que pede socorro e se aquece a cada dia. Pois melhor que plantar árvores, despoluir rios, proteger animais, é semear a consciência de que a garantia da vida é respeitar as fronteiras da natureza."

(Nildo Lage)

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	1
1.1 Objetivos	3
1.1.1 Objetivo geral.....	3
1.1.2 Objetivos específicos	3
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	5
2.1 Histórico da decomposição anaeróbica e a formação do biogás.....	5
2.1.1 Microbiologia da digestão anaeróbica	6
2.2 Fatores que influenciam a digestão anaeróbica.....	11
2.2.1 Quantidade de oxigênio.....	11
2.2.2 Níveis de pH.....	11
2.2.3 Temperatura	12
2.2.4 Toxidade.....	13
2.2.5 Nutrientes	14
2.2.6 Teor de água.....	14
2.2.7 Agitação e manutenção	14
2.3 Biodigestor	15
2.3.1 Histórico e panorama mundial	15
2.3.2 Disposição correta dos resíduos provindo da criação bovina em confinamento e vantagens da biodigestão	18
2.3.3 Modelos de biodigestores.....	23
2.4 Biogás.....	29
2.4.1 Propriedades e uso.....	29
2.4.2 Tratamento do biogás.....	32
2.4.3 Armazenamento do biogás.....	36
2.4.4 Potencial de produção do biogás.....	37

2.5 Benefícios do biofertilizante e do efluente mineralizado.....	38
2.6 Microturbina.....	40
2.6.1 Conexão com a rede elétrica e conversores de potência.....	45
2.6.2 Aproveitamento Energético.....	46
2.6.3 Panorama de Uso das Microturbinas.....	46
2.6.4 Microturbina específica para biogás.....	47
2.7 Benefícios do uso do biogás em microturbinas, cogeração e trigeriação.....	48
3. MATERIAIS E MÉTODOS.....	50
3.1 Localização e Caracterização da propriedade.....	50
3.2 Capacidade de produção de resíduos bovinos.....	59
3.3 Capacidade de produção de biogás.....	59
3.4 Poder calorífico do biogás.....	60
3.5 Seleção da microturbina e a produção de energia elétrica.....	61
3.6 Formas de aproveitamento energético – Aquecimento de água.....	63
3.7 Formas de aproveitamento energético – Efeito de refrigeração.....	65
3.8 Análise inicial de custo.....	70
4. RESULTADOS E ANÁLISE.....	71
5. CONCLUSÃO.....	82
6. BIBLIOGRAFIA.....	83

LISTA DE FIGURAS

<i>FIGURA 1.1 – Fontes de energia utilizadas no Brasil</i>	<i>1</i>
<i>FIGURA 2.1 - Estágios do processo de digestão anaeróbia.....</i>	<i>10</i>
<i>FIGURA 2.2 - Balanço da digestão anaeróbica</i>	<i>10</i>
<i>FIGURA 2.3– Sistema descontínuo (batelada) de produção de biogás.....</i>	<i>23</i>
<i>FIGURA 2.4– Diagrama esquemático do biodigestor tipo contínuo.....</i>	<i>24</i>
<i>FIGURA 2.5 – Biodigestor modelo Indiano.....</i>	<i>25</i>
<i>FIGURA 2.6 - Biodigestor modelo Chinês.....</i>	<i>27</i>
<i>FIGURA 2.7 - Biodigestor modelo Canadense.....</i>	<i>29</i>
<i>FIGURA 2.8 - Desenho esquemático de uma microturbina à gás.....</i>	<i>41</i>
<i>FIGURA 2.9 - Microturbina Capstone C60.....</i>	<i>41</i>
<i>FIGURA 2.10 - Diagrama esquemático de uma microturbina a gás.....</i>	<i>42</i>
<i>FIGURA 2.11 - Microturbina com regenerador.....</i>	<i>43</i>
<i>FIGURA 2.12 - Representação do eixo móvel de uma microturbina.....</i>	<i>44</i>
<i>FIGURA 2.13 - Microturbina Capstone CR30.....</i>	<i>47</i>
<i>FIGURA 3.1 - Barracão de confinamento.....</i>	<i>50</i>
<i>FIGURA 3.2 - Sala de ordenha.....</i>	<i>51</i>
<i>FIGURA 3.3 - Tanque resfriado para armazenamento do leite.....</i>	<i>51</i>
<i>FIGURA 3.4 - Grelhas de coleta de dejetos bovinos.....</i>	<i>52</i>
<i>FIGURA 3.5 - Grelhas de coleta de dejetos bovinos.....</i>	<i>52</i>
<i>FIGURA 3.6 - Vista da canaleta de condução de dejetos bovinos.....</i>	<i>53</i>
<i>FIGURA 3.7 - Caixa de entrada para a diluição do esterco.....</i>	<i>53</i>
<i>FIGURA 3.8 - Caixa de entrada do biodigestor, após a diluição dos dejetos.....</i>	<i>54</i>
<i>FIGURA 3.9 - Condução de dejetos pós diluição até o biodigestor.....</i>	<i>55</i>
<i>FIGURA 3.10 - Biodigestor modelo Canadense.....</i>	<i>55</i>
<i>FIGURA 3.11 - Lagoa aeróbica utilizada para a fertirrigação.....</i>	<i>56</i>
<i>FIGURA 3.12 - Conjunto motobomba utilizado para a fertirrigação.....</i>	<i>57</i>
<i>FIGURA 3.13 - Conjunto motobomba.....</i>	<i>57</i>
<i>FIGURA 3.14 - Conjunto motogerador.....</i>	<i>58</i>
<i>FIGURA 3.15 - Conjunto motogerador.....</i>	<i>58</i>
<i>FIGURA 3.16- Diagrama da potência elétrica e eficiência vs. temperatura ambiente.....</i>	<i>61</i>
<i>FIGURA 4.1- Produtividade média de biogás para 40 kg de dejetos (um animal).....</i>	<i>71</i>

<i>FIGURA 4.2- Produção de biogás em função do número de bovinos leiteiros.....</i>	<i>72</i>
<i>FIGURA 4.3- Potencial energético que pode ser obtido através da biodigestão de dejetos orgânicos de um bovino leiteiro.</i>	<i>73</i>
<i>FIGURA 4.4 - Produção energética da microturbina, e consumo energético do compressor em função do número de bovinos leiteiros.</i>	<i>74</i>
<i>FIGURA 4.5 - Geração líquida de energia da microturbina.....</i>	<i>74</i>
<i>FIGURA 4.6 - Quantidade de água aquecida (95 °C) produzida pelo recuperador de calor.</i>	<i>75</i>
<i>FIGURA 4.7 - Geração líquida de energia da microturbina com aquecimento de água.</i>	<i>76</i>
<i>FIGURA 4.8 - Capacidade de refrigeração fornecida pelo resfriador de líquido (chiller). ..</i>	<i>77</i>
<i>FIGURA 4.9 - Geração líquida de energia elétrica da microturbina com refrigeração (chiller).</i>	<i>78</i>
<i>FIGURA 4.10 – Energia elétrica gerada pela microturbina e o consumo elétrico dos equipamentos utilizados para os casos de: geração direta, com o uso de aquecimento de água e com o uso do resfriamento de líquido, obtido por um animal (para os dados apresentados na tabela 4.1).</i>	<i>79</i>
<i>FIGURA 4.11 – Fornecimento líquido de energia elétrica para os casos de: geração direta, com o uso do aquecimento de água e com o uso do resfriamento de líquido, obtido por um animal (para os dados apresentados na tabela 4.1).</i>	<i>79</i>
<i>FIGURA 4.12 – Quantidade de energia contida no biogás, na energia elétrica gerada e no volume de água aquecida produzida, obtido para um animal.</i>	<i>80</i>
<i>FIGURA 4.18 – Quantidade de energia contida no biogás, na energia elétrica gerada e na capacidade de refrigeração produzido pelo resfriador de líquido, obtido para um animal. ..</i>	<i>80</i>

LISTA DE TABELAS

<i>TABELA 2.1 – Composição típica do biogás processado num biodigestor.....</i>	<i>30</i>
<i>TABELA 2.2 – Energia equivalente produzido pelo biogás.....</i>	<i>31</i>
<i>TABELA 2.3 – Consumo de biogás em diferentes utilidades.....</i>	<i>31</i>
<i>TABELA 2.4 - Sistemas de armazenamento de biogás.....</i>	<i>36</i>
<i>TABELA 2.5 - Potencial de produção de biogás a partir de dejetos animais.....</i>	<i>37</i>
<i>TABELA 2.6 - Especificações técnicas da microturbina CAPSTONE CR30.....</i>	<i>48</i>
<i>TABELA 3.1 - Dados Técnicos do Compressor Mehrer TRE 200</i>	<i>62</i>
<i>TABELA 3.2 - Dados Técnicos do Recuperador de Calor ITC 1.....</i>	<i>64</i>
<i>TABELA 3.3 - Dados Técnicos do Chiller LWM-W003</i>	<i>67</i>
<i>TABELA 3.4 - Custo aproximado dos equipamentos utilizados para geração de energia e aproveitamento térmico.....</i>	<i>70</i>

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ACRISSUL - Associação dos Criadores de Mato Grosso do Sul

AGEITEC - Agência Embrapa de Informação Tecnológica

ANAEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica

ASSOCON - Associação Nacional dos Confinadores

CENBIO - Centro Nacional de Referência em Biomassa

CERs - Certificados de Emissões Reduzidas

COP - Coeficiente de Performance (Rendimento)

COPEL - Companhia Paranaense de Energia

EEA - Empresa de Engenharia Ambiental

EMATER - Empresa de Assistência Técnica e Extensão Rural

ETE - Estação de Tratamento de Esgoto

GLP - Gás Liquefeito de Petróleo

MDL - Mecanismos de Desenvolvimento Limpo

PCI - Poder Calorífico Inferior

PCS - Poder Calorífico Superior

SABESP - Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo

TECPAR - Instituto de Tecnologia do Paraná

TR - Tonelada de Refrigeração

TRH - Tempo de Retenção Hidráulica

LISTA DE SÍMBOLOS

$\%_{CH_4}$ = Quantidade (percentual) de gás metano presente no biogás

\dot{m}_{H_2O} = vazão mássica de água de recirculação [kg/s]

$\dot{m}_{gás}$ = Vazão mássica dos gases de exaustão da microturbina [kg/s]

COP_{abs} = Coeficiente de performance (rendimento) do resfriador de líquido (chiller)

Cp_{H_2O} = Calor específico da água [kJ/kg·K]

$Cp_{gás}$ = Calor específico dos gases de exaustão [kJ/kg·K]

E_{Chi} = Energia consumida pela bomba do resfriador de líquido (chiller) [kWh]

E_{Comp} = Energia elétrica consumida pelo compressor [kWh]

E_{Mic} = Energia elétrica gerada pela microturbina [kWh]

E_{PCI} = Potencial energético fornecido pelo biogás em função do PCI do biogás [kJ]

E_{PCS} = Potencial energético fornecido pelo biogás em função do PCS do biogás [kJ]

E_{Rec} = Energia elétrica consumida pela bomba do recuperador de calor [kWh]

P_{Chi} = Potência elétrica da bomba do resfriador de líquido (chiller) [kW]

PCI_{CH_4} = Poder Calorífico Inferior do gás metano [kJ/Nm³]

$PCI_{biogás}$ = Poder Calorífico Inferior do biogás [kJ/Nm³]

PCS_{CH_4} = Poder Calorífico Superior do gás metano [kJ/Nm³]

$PCS_{biogás}$ = Poder Calorífico Superior do biogás [kJ/Nm³]

P_{Comp} = Potência elétrica consumida pelo compressor [kW]

P_{Mic} = Potência elétrica gerada pela microturbina nas condições ambientes de operação [kW]

P_{Rec} = Potência elétrica consumida pela bomba do recuperador de calor [kW]

P_c = Potencial de conversão da matéria orgânica em biogás [m³ de biogás/kg de esterco]

Q_h = Volume produzido de água aquecida a 95 °C [m³]

Q_F = Capacidade de refrigeração do resfriador de líquido (chiller) [kWh]

\dot{Q}_G = Taxa de calor que entra no resfriador de líquido (chiller) [kW]

T_h = Temperatura da água na saída do recuperador de calor [K]

T_a = Temperatura da água na entrada do recuperador de calor [K]

T_e = Temperatura da água na entrada do resfriador de líquido (chiller) [K]

T_{er} = Temperatura dos gases de exaustão na entrada do recuperador de calor [K]

T_s = Temperatura da água na saída do resfriador de líquido (chiller) [K]

T_{sr} = Temperatura dos gases de exaustão na saída do recuperador de calor [K]

V_h = Volume de água aquecida disponível no recuperador de calor [m³]

$V_{biogás}$ = Volume de biogás produzido [m³]

t_{Comp} = Tempo de operação do compressor [h]

t_{chi} = Tempo de operação do resfriador de líquido (chiller) [h]

t_{Rec} = Tempo de operação do recuperador de calor [h]

w_b = Potência elétrica consumida pela bomba do resfriador de líquido (chiller) [kW]

t_{aq} = Tempo consumido para aquecer a água da temperatura ambiente até 95°C [h]

ρ_{H_2O} = Massa específica da água [kg/m³]

ϕ_{comp} = Vazão volumétrica de compressão [m³/h]

ϕ_{mic} = Fluxo energético requerida pela microturbina para operar [kJ/h]

Q = Quantidade de matéria orgânica utilizada [kg]

C_{Bruto} = Custo bruto da energia elétrica produzida [R\$/kW]

C_e = Custo do equipamento [R\$]

$P_{el\ inst}$ = Potência elétrica instalada [kW]

$C_{Líquido}$ = Custo líquido da energia elétrica produzida [R\$/kW]

$P_{el\ Térmica}$ = Potência elétrica de origem térmica [kW]

$P_{el\ gasto}$ = Potência elétrica consumida pelos equipamentos [kW]

RESUMO

A crescente demanda energética e as constantes preocupações com questões ambientais, como o aquecimento global e a preservação de recursos naturais, tem feito a humanidade buscar fontes alternativas de energias limpas. Neste cenário, o uso de biodigestores em propriedades rurais têm significado um importante avanço sobre questões energéticas, ambientais e de sanitarismo, pois os resíduos provenientes da agropecuária, principalmente da criação de animais em confinamento podem ser dispostos de maneira correta. Ao final do processo de biogestão anaeróbica é possível obter três subprodutos de grande valor agregado: o biofertilizante, que é rico em nutrientes; o efluente mineralizado, que pode servir de base para a produção de ração; e o biogás, que é um gás combustível rico em metano. Este trabalho visou apresentar uma análise sobre a produção de biogás através de um biodigestor em uma propriedade rural destinada à criação de bovinos leiteiros, e o uso do biogás em microturbinas específicas para a geração de energia elétrica, e as formas de aproveitamento energético dos gases de escape da microturbina, visando à produção de calor e frio. Também realizou uma avaliação sobre a economia de energia elétrica que o uso do biogás agrega à propriedade. Para a confecção deste trabalho foram realizados levantamentos de dados sobre a produção e a composição do biogás comumente encontrado em biodigestores rurais, e informações técnicas sobre microturbina, compressor, recuperador de calor e resfriador de líquido junto aos seus fabricantes. Ao final do presente estudo, pôde-se verificar que é possível produzir através do uso do biogás em microturbinas entre 5.931 kWh/mês a 11.751 kWh/mês de energia elétrica com os dejetos orgânicos recolhidos de 240 bovinos leiteiros, o que representa aproximadamente entre 41 a 82 % da demanda energética da propriedade rural analisada. Além disso, através do aproveitamento térmico dos gases de escape da microturbina é possível obter 8,5 m³/dia de água aquecida a 95 °C que poderá ser destinada à limpeza de ambientes e equipamentos; ou mesmo pode-se utilizar da água aquecida proveniente do recuperador de calor em um resfriador de líquido, sendo possível produzir aproximadamente 14.850 kWh/mês de capacidade de refrigeração, que poderá ser empregada para o resfriamento inicial do leite proveniente da ordenha.

PLAVRAS – CHAVES: Biogás, Microturbina, Aproveitamento Energético.

ABSTRACT

The increasing energy demand and ongoing concerns with environmental issues such as global warming and the preservation of natural resources, has made mankind seek alternative sources of clean energy. In this scenario, the use of digesters on farms have meant an important step forward on energy, environmental and sanitarium issues, as waste from agriculture, mainly the creation of confinement on animals can be arranged properly. At the end of anaerobic biodigestion process can get three big value-added by-products: the biofertilizer, which is rich in nutrients; mineralized effluent, which can serve as a basis for the production of feed; and biogas, which is a fuel rich in methane gas. This work aims to present an analysis on the production of biogas through a digester on a farm intended for rearing dairy cattle, and the use of biogas in specific micro turbines to generate electricity, and the forms of energy use of gas the microturbine exhaust, in order to heat and cold. Also conducted an evaluation of the energy savings that the use of biogas adds to property. To prepare this report, data surveys have been conducted on the production and biogas composition commonly found in rural digesters, and technical information on microturbine, compressor, heat exchanger and liquid chiller with its manufacturers. At the end of this study, it was observed that it is possible to produce through the use of biogas microturbines in about 5,931 kWh per month to 11,751 kWh per month of electricity from organic waste collected from 240 dairy cattle, which represents approximately 41-82% of the energy demand of rural property analyzed. Furthermore, through the use of heat of exhaust gas microturbine is possible to obtain 8.5 m³ per day of water at 95 ° C which can be utilized to clean environments and equipment; or one may use the heated water from the heat recovery in a liquid cooler, it is possible to produce approximately 14,850 kWh per month of cooling capacity which may be employed for initial cooling of the milking milk.

KEY WORDS: Biogas, Microturbine, Energy Use.

1. INTRODUÇÃO

As fontes de energias mais difundidas e empregadas atualmente provêm principalmente de combustíveis fósseis como petróleo, carvão mineral e gás natural; de combustível nuclear e de hidroelétricas. Entretanto, os usos destas fontes de energia possuem algumas limitações e cuidados, por exemplo, as reservas naturais de combustíveis fósseis tendem a se esgotarem, e com isso trazer instabilidades no seu preço; o combustível nuclear exige muita cautela no processo de geração de energia elétrica e na disposição dos seus resíduos, já que estes são emissores de radiação, que é prejudicial ao ser humano; já as hidroelétricas necessitam de um regime de chuva uniforme para que seus reservatórios possam estar sempre com níveis adequados. Aliado a isso, existe uma preocupação mundial na redução de emissões de gases poluentes na atmosfera, devido principalmente ao aquecimento global e suas consequências como as mudanças climáticas. Devido a estas preocupações, percebe-se a necessidade do desenvolvimento de novas fontes de energia alternativas, que possam suplementar e diversificar a matriz energética, além de reduzir as emissões de poluentes. A Figura 1.1, ilustra as fontes de energia em operação no Brasil.

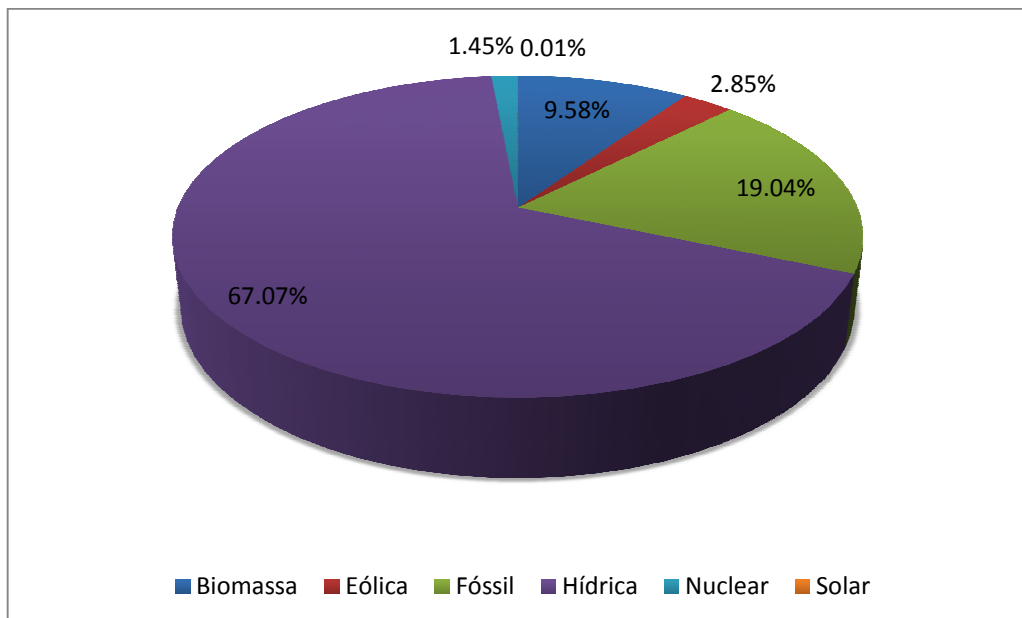


FIGURA 1.1 – Fontes de energia utilizadas no Brasil
Fonte: ANAEEEL, 2014

Pelo panorama apresentado pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANAEEEL,2014)¹, percebe-se que o Brasil possui 79,5 % da energia produzida de forma renovável, contribuindo assim para uma geração de energia mais sustentável. Entretanto, verifica-se que o país fica muito dependente da geração de energia através das hidroelétricas, que dependem muito do regime de chuvas para encher os reservatórios. Recentemente o país passou por um período de forte estiagem, o que resultou em baixíssimos níveis de água nos reservatórios das hidroelétricas localizados próximos aos grandes centros industriais, onde há o maior consumo de energia. Isto forçou o governo a colocar em operação as termoelétricas abastecidas principalmente por gás natural e óleo diesel. Este efeito culminou no aumento dos custos da energia elétrica produzida, e no uso de combustíveis fósseis não renováveis e poluentes. Tendo isto em vista, o uso de outras fontes de energia, principalmente as formas de energia renováveis têm-se mostrado muito atrativas. O Brasil possui uma extensa área territorial, com clima bastante favorável para a exploração e o uso de energias renováveis provindas de diversas fontes, como a solar, a eólica, maré-motriz e a biomassa.

A biomassa tem se mostrado uma alternativa para a geração de energia elétrica, além de ser uma fonte de energia renovável, não ocorrem, durante sua utilização, emissões de óxidos de enxofre, responsáveis pelas chuvas ácidas, e nem a contribuição para o aumento do efeito estufa, já que possui o ciclo de carbono fechado. Ou seja, o CO₂ emitido durante o processo de combustão é absorvido durante a fotossíntese das plantas. Não sendo liberado nenhum carbono líquido para a atmosfera.

O biogás pode ser obtido de maneira simples, através da decomposição anaeróbica da biomassa, que é toda matéria orgânica de origem animal ou vegetal. O biogás é composto basicamente de dióxido de carbono (CO₂) e de metano (CH₄), este último possui alto poder calorífico que pode ser aproveitado para a geração de energia elétrica e térmica. Além disso, ao realizar a queima do biogás, impede-se que o gás metano seja lançado diretamente para a atmosfera, diminuindo assim os efeitos do aquecimento global, tendo em vista que a molécula do gás metano possui um alto poder de absorção da radiação solar.

Uma maneira de obtenção desta matéria orgânica seria o aproveitamento dos resíduos orgânicos provindos da agropecuária, tanto do cultivo de alimentos, quanto da criação de animais.

¹ <http://www.anaeel.gov.br/aplicacoes/capacidadebrasil/Combustivel.cfm>

Considerado um dos principais causadores de problemas ambientais no agronegócio, os dejetos gerados da criação de animais podem provocar danos ao próprio animal, ao homem que trabalha no sistema produtivo e ao meio ambiente como um todo, uma vez que pode ser causa de doenças nos animais e no homem ocasionando prejuízo ao próprio empreendimento.

Uma alternativa para a disposição adequada dos resíduos orgânicos é o uso de biodigestores, que consiste de uma câmara hermeticamente fechada, onde diversos grupos de bactérias anaeróbicas degradam a matéria orgânica, evitando assim a poluição do meio ambiente e a proliferação de doenças; além de produzir ao final do processo de digestão anaeróbica, subprodutos grandemente apreciados, como o biogás, que pode ser utilizado para diversas finalidades (cozimento de alimentos, iluminação, conforto térmico, produção de frio, geração de energia elétrica, entre outros); o biofertilizante (rico em nutrientes, e que substitui com facilidade os fertilizantes industriais); e o efluente mineralizado (utilizado como base para a confecção de rações para animais).

Uma opção para o uso do biogás seria sua utilização em microturbinas específicas para a geração de energia elétrica, pois são equipamentos que podem ser alimentados com biogás pobre em gás metano e com elevado grau de impurezas, tais como dióxido de carbono e sulfeto de hidrogênio. Além de serem equipamentos que necessitam de pouca manutenção, também emitem após o processo de combustão, gases com baixos níveis de poluentes. Outro benefício importante, é o aproveitamento dos gases de exaustão da microturbina para a produção de água aquecida, através do uso de um trocador de calor; ou mesmo para a produção de frio, por meio de um resfriador de líquido (chiller), aumentando assim a eficiência energética do processo.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo geral

O objetivo geral deste trabalho visa avaliar a utilização do biogás gerado em biodigestores a partir de dejetos bovinos para o acionamento de microturbinas com a finalidade de geração de energia elétrica.

1.1.2 Objetivos específicos

- ✓ Estimar o potencial energético que pode ser obtido na propriedade analisada através do uso do biogás de composição típica em microturbinas específicas.

- ✓ Estimar o potencial energético que pode ser obtido pela microturbina ao realizar o aproveitamento energético dos gases de exaustão tanto para o aquecimento de água, quanto para a produção de frio por meio de um resfriador de líquido (chiller).
- ✓ Comparar os resultados obtidos com a demanda energética da propriedade.
- ✓ Estimar a quantidade de água aquecida que poderá ser obtida com o uso de um recuperador de calor.
- ✓ Estimar a quantidade de frio, que um resfriador de líquido pode fornecer à propriedade.
- ✓ Estimar a eficiência energética para o processo de geração de energia elétrica com aquecimento de água, e para o processo de geração de energia elétrica com resfriamento de líquido.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Histórico da decomposição anaeróbica e a formação do biogás.

A decomposição anaeróbica da matéria orgânica é um processo natural que ocorre em pântanos, lagos e rios. Tal processo representa a conversão microbiológica da matéria orgânica em metano, em um ambiente isento de oxigênio.

O biogás foi descoberto em 1667 por Shirley, mas foi reconhecido somente em 1776 por Alessandro Volta, como "ar combustível", substância presente principalmente nos pântanos. Oitenta anos depois, Reiset detectou a formação de metano em estrumeiras e propôs o estudo do manejo dos resíduos para explicar o processo de decomposição anaeróbica. No século XIX, Ulysse Gayon, aluno de Louis Pasteur, realizou a fermentação anaeróbica de uma mistura de estrume e água, a 35°C, obtendo 100 litros de gás por metro cúbico de matéria.

Bechamp, em 1868, concluiu que o gás metano é formado por microrganismos. Sendo que em 1875, Popoff, investigou a formação de metano a partir de vários substratos. Em 1890, Van Senus verificou que a decomposição anaeróbica era feita por vários microrganismos, e Omelianski isolou organismos que produziam hidrogênio, ácido acético e ácido butanóico, a partir da celulose. Deduziu também que o metano seria produzido a partir da redução do gás carbônico por hidrogênio.



Em 1910, Sohngen verificou que a fermentação de materiais orgânicos produz compostos reduzidos como hidrogênio, ácido acético e gás carbônico. Demonstrou também que ocorre a redução de CO_2 para a formação de metano e assumiu que o ácido acético é descarbonizado para fermentação de metano. Essa hipótese, hoje considerada correta, permaneceu em controvérsia por várias décadas.

Em 1914, Thum e Reichle concluíram que o processo se dava em duas fases: ácida e metanogênica. Em 1916, Imhoff, denominou de digestão ácida e a digestão metanogênica as fases do processo.

Em 1940, Barker isolou a *Methanobacterium omelianski*, responsável pela oxidação do etanol a acetato (ácido acético), e posteriormente a oxidação do acetato a gás metano. Em 1948, Buswell e Sollo, utilizando ^{14}C provaram que o metano vindo do acetato não ocorre através de redução de CO_2 .

Em 1956, Jerris verificou que 70% do metano produzido vinham do acetato. Em 1967, Briant publicou que existem duas espécies de bactérias que convertem a metano. Uma pela via do acetato e outra pelo hidrogênio (EMPRESA DE ENGENHARIA AMBIENTAL - EEA, 2014).

2.1.1 *Microbiologia da digestão anaeróbica*

O processo de digestão anaeróbica é uma alternativa interessante para o tratamento de resíduos orgânicos, obtendo-se no final do processo subprodutos de elevados valores comerciais. De acordo com Buendía (2008), devido à necessidade de constantes aerações do efluente, o que gera um aumento do gasto energético, o sistema de biodigestão anaeróbica não é adequado para o tratamento de resíduos com elevado conteúdo de material orgânico, resíduos que são dificilmente biodegradáveis, e para os resíduos que apresentam a relação carbono/nitrogênio e carbono/fósforo desproporcionais, pois o desempenho do sistema fica muito reduzido.

De acordo com EEA (2014), de uma forma geral, o processo de digestão anaeróbica ocorre em quatro etapas principais. Na primeira etapa do processo, a matéria orgânica completa é transformada em compostos mais simples como ácidos graxos, aminoácidos e açúcares pela ação de microrganismos hidrolíticos.

Em uma segunda etapa, as bactérias acidogênicas transformam os ácidos e açúcares em compostos mais simples como ácidos graxos de cadeias menores, ácido acético, H_2 e CO_2 .

Na terceira etapa, compostos simples como ácidos graxos voláteis de cadeias menores são transformados principalmente em ácido acético, H_2 e CO_2 , pela ação das bactérias acetogênicas.

Por fim, na última etapa, os microrganismos metanogênicos transformam esses substratos em gás metano (CH_4) e em dióxido de carbono (CO_2).

As fases do processo descrito anteriormente podem ser detalhadas da seguinte forma:

➤ Fase da hidrólise

Para Silva (2009), a hidrólise é um processo pelo qual o material orgânico presente no sistema é transformado em compostos dissolvidos de menor peso molecular. De acordo com Harris (2005), ocorre o processo propriamente denominado de hidrólise, o qual consiste na reação de qualquer espécie com água.

Segundo EEA (2014), nesta fase, ocorre a hidrólise dos polímeros de cadeia longa que é feita pelas bactérias hidrolíticas. Sendo hidrolisados principalmente a celulose, as proteínas e os lipídios. Para Feng (2008), materiais orgânicos complexos, carboidratos, aminoácidos, ácidos graxos de cadeia longa e alcoóis são convertidos a compostos orgânicos de cadeia curta, que serão metabolizados na fase seguinte.

A celulose é um polímero de cadeia longa, que é facilmente degradada pelas bactérias aeróbicas, mas devido ao processo anaeróbico estas bactérias não sobrevivem, tornando a hidrólise da celulose mais complicada. Além das bactérias celulósicas, que podem ser encontradas em fezes humanas e de animais, os protozoários também contribuem para a fermentação da celulose.

Segundo Haandel e Lettinga (1994), as proteínas são degradadas para formar aminoácidos, os carboidratos se transformam em açúcares solúveis e os lipídios são convertidos em ácidos graxos de cadeia longa (entre quinze a dezessete carbonos na cadeia principal) e em glicerina.

Além da presença de oxigênio, duas condições são essenciais para a manutenção deste tipo de bactéria. Sendo necessário, o pH do meio estar próximo a seis e a temperatura próxima a 45°C. De acordo com Veeken *et al.* (2000), a fase da hidrólise se torna limitante se o substrato se apresentar na forma particulada.

A lignina presente na biomassa, na razão de cerca de 20 a 30%, geralmente resistente à degradação anaeróbica, deve estar numa temperatura alta e presente em meio básico para ser solubilizado e transformado em pequenos compostos que são facilmente digeridos para metano e dióxido de carbono. Além desse, se fazem necessários às quebras da pectina, um polissacarídeo de cadeia complexa, e também dos lipídios, que consiste de glicerinas de cadeias longas de ácidos carbônicos.

A fase da hidrólise é um passo limitante para a conversão de matéria orgânica em metano, pois os produtos formados nesta fase são fermentados e depois transformados em gás metano.

Na transição entre as fases da hidrólise para a fase da acidogênese, ocorre a conversão da matéria orgânica solúvel produzida pela fase da hidrólise em substrato para a metanogênese, através da bactéria transicional. Sendo que o acetato produzido por estas bactérias, pode ser metabolizado diretamente em metano pelas bactérias metanogênicas, sendo desnecessárias as interações catabólicas com outras bactérias.

➤ Fase da Acidogênese

Segundo Bengtsson *et al.* (2008), os produtos gerados na hidrólise, como os açúcares e os aminoácidos, são absorvidos por bactérias acidogênicas fermentativas e fermentados intracelularmente em substâncias orgânicas simples como ácidos graxos voláteis, como ácidos acético, fórmico, propanóico, butanóico e láctico, além de etanol. Também são sintetizados compostos minerais, além de dióxido de carbono, gás hidrogênio, amônia, sulfeto de hidrogênio e acetato.

As reações bioquímicas pelos quais os substratos são fermentados, e os produtos formados dependem principalmente do tipo de substrato utilizado na digestão anaeróbica e da pressão parcial do hidrogênio presente.

No processo da acidogênese a maioria das bactérias são anaeróbicas obrigatórias, existindo também espécies facultativas, onde metabolizam o material orgânico pela via oxidativa.

➤ Fase da Acetogênese

Nesta fase, as bactérias acetogênicas convertem os ácidos graxos e o etanol em acetato, dióxido de carbono e gás hidrogênio, que são substratos para as bactérias metanogênicas. Segundo Ghosh (1981), a fermentação acetogênica possui um papel fundamental na conversão da matéria orgânica em metano, pois a conversão do substrato a acetato (principal substrato para a síntese do metano) deve ser rápida para que a produção de energia seja viável economicamente. Portanto, não havendo a síntese do acetato, não haverá a produção de gás metano.

Segundo Haandel e Lettinga (1994), se houver algum desequilíbrio nas taxas de remoção de ácidos voláteis, poderá ocorrer um aumento da produção líquida de ácidos, resultando na diminuição do pH do meio, e causar conseqüentemente uma redução na atividade metanogênica. O aumento da produção líquida de ácidos é

denominado acidificação, sendo a causa comum da falha operacional no processo de digestão anaeróbica.

➤ Fase da Metanogênese

O último processo da digestão anaeróbica é formado pelas bactérias metanogênicas. Elas utilizam-se do ácido fórmico, do acetato, do metanol, da metilamina, do gás hidrogênio e do dióxido de carbono, para convertê-los em gás metano e dióxido de carbono, através de reações bioquímicas.

O gás metano pode ser produzido por dois grupos de bactérias, as acetotróficas, que se utilizam do acetato, ou as hidrogenotróficas, que se utilizam do dióxido de carbono e do hidrogênio. Aproximadamente 70 % do gás metano produzido é oriundo do acetato, e 30 % provêm da redução do dióxido de carbono e do hidrogênio.

As reações bioquímicas para a síntese do gás metano contribuem para a redução da pressão parcial do hidrogênio, viabilizando desta forma as etapas anteriores do processo de digestão anaeróbica. Esta fase limita o processo de digestão anaeróbica. Além disso, a presença dos microrganismos acetotróficos, influenciam o pH do meio, pois este grupo de bactérias consomem o acetato para a síntese do gás metano, diminuindo a acidez.

A formação do gás metano ao final do processo de biodigestão depende da existência de populações com funções distintas, e em proporções quantitativas corretas, permitindo assim a manutenção do fluxo de substratos e energia.

As Figuras 2.1 e 2.2 representam respectivamente os estágios do processo de digestão anaeróbica, e o balanço percentual das reações bioquímicas que ocorrem durante o processo de biodigestão da matéria orgânica.

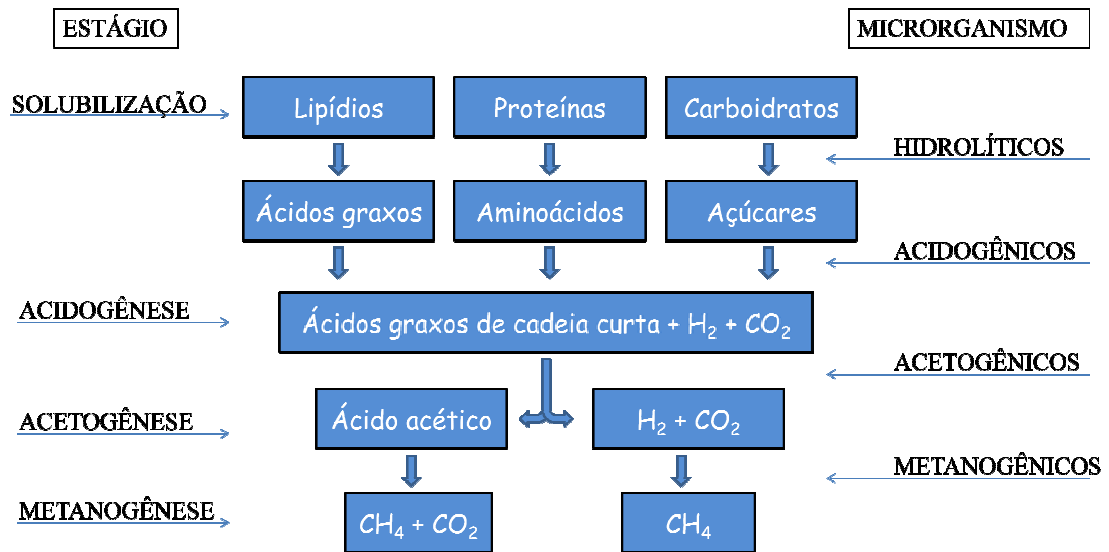


FIGURA 2.1 - Estágios do processo de digestão anaeróbia

Fonte: SAM-SOON (1987)

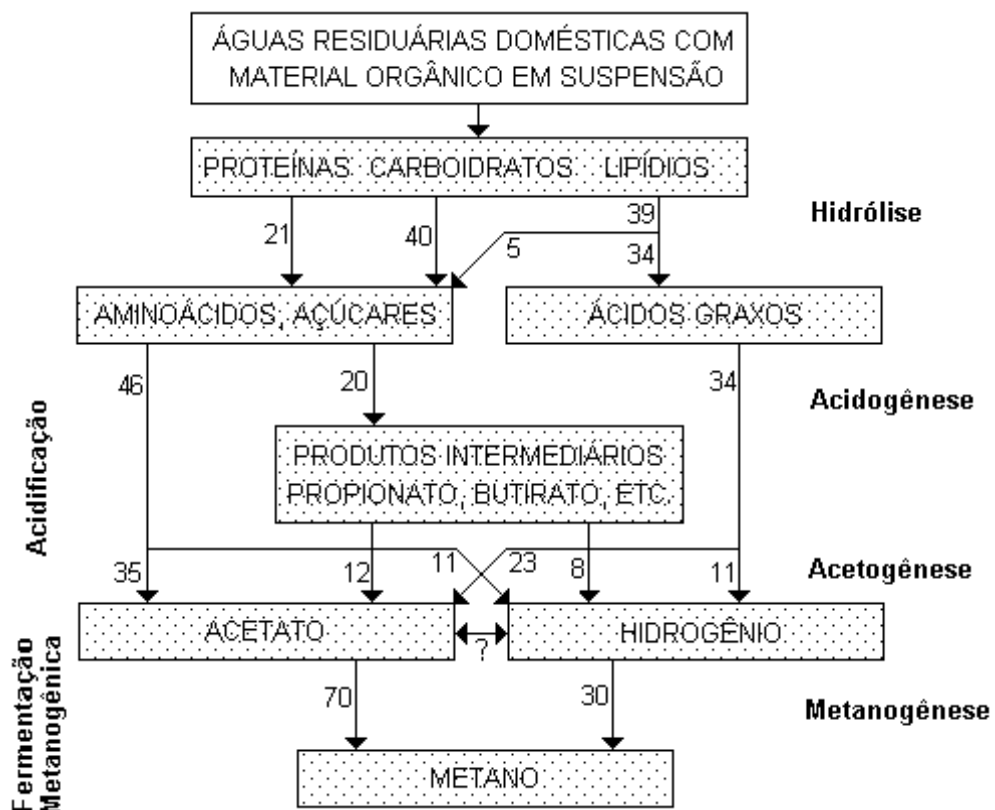


FIGURA 2.2 - Balanço da digestão anaeróbia

Fonte: HAANDEL & LETTINGA (1994)

2.2 Fatores que influenciam a digestão anaeróbica

O processo de digestão anaeróbica depende de alguns fatores que influenciam no equilíbrio delicado entre as populações de bactérias. O aumento repentino da carga orgânica, o grau de contato entre as bactérias e a matéria orgânica, a mudança de temperatura e pH, e a influência de composto tóxicos, são alguns fatores que podem alterar o equilíbrio entre as populações de bactérias. De acordo com Atkinson e Mavituna (1987), a concentração de oxigênio, o tipo de substrato, a concentração de nutrientes, composição do meio, tipo de acceptor final de elétrons, pH, temperatura e a presença de substâncias inibidoras influenciam no crescimento dos microrganismos. Segundo Lehninger (1976), os microrganismos são capazes de regular suas reações metabólicas e a biossíntese de suas próprias enzimas, para atingir a máxima eficiência e economia.

2.2.1 *Quantidade de oxigênio*

A decomposição da matéria orgânica na ausência de ar (oxigênio) estimula a formação de gás metano. Toda a atividade biológica dos microrganismos anaeróbicos, tal como seu desenvolvimento, metabolismo e reprodução não exigem a presença de oxigênio. Para Salomom e Filho (2007), o organismo anaeróbico não pode sobreviver em locais com oxigênio, e por este motivo, o digestor não deve ter entrada de ar. Portanto, se o biodigestor não estiver devidamente vedado, impedindo a entrada do ar, a produção de biogás será inibida, pois as bactérias anaeróbicas são extremamente sensíveis quanto à presença de oxigênio.

2.2.2 *Níveis de pH*

Para Salomom (2007), o pH se manifesta sob diferentes formas alterando as cargas de sítios ativos das enzimas, modificando estruturas e conseqüentemente perdendo suas características, aumentando ou diminuindo a toxicidade destes.

O processo de biodigestão é formado por diversos grupos de bactérias convivendo ao mesmo tempo e no mesmo ambiente, e cada uma delas se desenvolvem numa faixa específica de pH. Devido a este fato, Soares (1990), recomenda buscar uma faixa de pH, no qual se propicie o crescimento máximo da maior parte dos microrganismos envolvidos no processo. O equilíbrio entre as populações de microrganismos proporcionam a estabilização do pH próximo à neutralidade.

Para que o processo de digestão anaeróbica seja mais eficiente, recomenda-se que o pH do meio esteja entre 6,8 a 7,5, podendo atingir limites de pH próximos a 6 e 8. Entretanto, quanto mais próximo for dos extremos inferior e superior do pH, o processo ocorre a uma taxa mais lenta. O principal fator de entrave de um biodigestor é o sistema gás carbônico/bicarbonato. Uma quantidade adequada de alcalinidade provindo do bicarbonato deveria estar sempre disponível para prevenir uma queda do pH para níveis inferiores a 6, causados pela rápida formação de ácidos voláteis do material orgânico complexo e devido à metanogênese retardada, que pode ser causada por uma diminuição da temperatura.

Os ácidos voláteis não dissociados, podem penetrar na membrana celular das bactérias e sofrer dissociação dentro delas, diminuindo assim o pH no interior delas, e por consequência causando sua morte.

Para Lettinga e Rinzema (1985), a matéria orgânica rica em compostos sulfonados pode gerar problemas de inibições em concentrações acima de 145 mg enxofre por litro de H₂S não dissociado, pois este pode causar a diminuição do pH do meio. Entretanto, os autores ressaltam que a presença de sulfeto de hidrogênio é um nutriente essencial para a manutenção das bactérias metanogênicas.

2.2.3 *Temperatura*

As bactérias metanogênicas são bastante sensíveis às variações de temperaturas, principalmente em temperaturas mais elevadas. O processo de metanogênese pode ocorrer na faixa psicrófila (de 0°C a 20°C), ou na mesófila (de 15°C a 45°C), sendo ideais as temperaturas entre 35°C e 37°. Nesta faixa, as bactérias metanogênicas aceitam pequenas variações de temperatura do meio, desde que não sejam bruscas. Na faixa termófila (de 50° a 65°C), recomenda-se evitar variações de temperatura do meio, sendo ideais as temperaturas

entre 57°C e 62°C. Nesta faixa, permite-se trabalhar com elevadas cargas orgânicas e com menor tempo de retenção, proporcionando maior produção de biogás.

Por serem muito suscetíveis à temperatura, as bactérias metanogênicas requerem maior controle de temperatura, pois uma queda na temperatura do meio, poderá causar um aumento de ácidos voláteis e conseqüentemente uma queda do pH.

Segundo Salomom e Filho (2007), a escolha da temperatura de trabalho terá de resultar do compromisso entre o volume de gás a ser produzido, o grau de fermentação e o tempo de retenção hidráulica.

2.2.4 *Toxidade*

A toxidade tem sido considerada uma das principais razões para baixa aplicabilidade dos processos anaeróbicos, como alternativa de tratamento de resíduos orgânicos, isto se deve ao fato das bactérias metanogênicas serem facilmente inibidas pelas toxinas.

De acordo com Salomom e Filho (2007), qualquer elemento em excesso no digestor pode provocar sintomas de toxidade ao meio bacteriano. Entretanto a definição exata da concentração em que estes elementos passam a ser nocivos é complicada, devido à complexidade do processo.

Os compostos tóxicos podem ou não estar presente na matéria orgânica a ser decomposta. Entretanto, seus efeitos sobre as populações de bactérias podem ser benéficas ou maléficas. Caso as populações de bactérias não se adaptem com determinadas concentrações de compostos tóxicos, estas podem ser bactericidas. Os compostos tóxicos podem ser bacteriostáticos quando as bactérias se adaptam aos compostos.

As populações de bactérias anaeróbicas têm grande capacidade de adaptação às cargas tóxicas, mas é necessário um tempo para que se estabeleça um equilíbrio no processo. Para as populações de bactérias não adaptadas, o tempo necessário para o processo se estabilizar novamente é proporcional à concentração de tóxicos adicionados.

Além da aclimação, outra maneira de combater os compostos tóxicos é a anulação dos efeitos de toxicidade de uma substância pela presença de outra. Como por exemplo, o sódio e o potássio, que se anulam, e desta forma diminuem os efeitos de toxidades de ambas as substâncias.

2.2.5 *Nutrientes*

Para que os microrganismos decompositores da matéria orgânica sobrevivam, se faz necessário a presença de alguns compostos como carbono, nitrogênio e sais orgânicos. Segundo Salomom e Filho (2007), uma proporção de 20:1 até 30:1, entre carbono e nitrogênio deve ser mantido. Os compostos nitrogenados estão presentes principalmente nos dejetos de animais.

Para Bonturi e Dijk (2012), o excesso de carbono presente na matéria orgânica, quando se utiliza muito material celulósico (principalmente serragem) é prejudicial à produção de gás metano, pois o excesso de celulose beneficia a produção de gás carbônico. O mesmo ocorre quando se utiliza compostos ricos em nitrogênio, como urina, sangue, entre outros.

A presença de bicarbonato de amônia, resultante da biodegradação de compostos orgânicos ricos em proteínas e ureia são benéficas ao sistema de biodigestão. Tais compostos são utilizados como fonte de nitrogênio e como tampão para as alterações de pH (CHERNICHARO, 1997).

2.2.6 *Teor de água*

A quantidade de água que deve ser acrescida à matéria orgânica depende do tipo e da qualidade do substrato a ser utilizado no processo. A falta ou excesso de água no substrato a ser fermentado são prejudiciais. Salomom e Filho (2007) recomendam que o teor de água seja próximo a 90 % do peso do conteúdo total.

2.2.7 *Agitação e manutenção*

Segundo Dalmazo, Bazi e Oliveira (2009), o processo de agitação da matéria orgânica em decomposição se faz necessário para homogeneizar os dejetos e aumentar a produção de biogás. O principal objetivo deste procedimento é movimentar o lodo que está no fundo do biodigestor, evitando assim a deposição e formações de crostas. Além disso, a agitação

possibilita a movimentação das bactérias anaeróbicas e a uniformização da temperatura no interior do biodigestor.

A remoção de parte dos dejetos dos biodigestores é imprescindível para evitar o acúmulo dos materiais como: areia, calcários e sólidos no fundo do biodigestor, elementos que podem causar o entupimento do sistema de alimentação.

2.3 Biodigestor

2.3.1 Histórico e panorama mundial

Segundo Nishimura (2009), o biodigestor é uma câmara hermeticamente fechada onde ocorre o processo de digestão anaeróbica da matéria orgânica em solução aquosa, formando o biogás e o biofertilizante.

A Índia e China foram os primeiros países a desenvolverem e construir os biodigestores. De acordo com Nogueira (1986) e Shih (1984), em 1857 foi construído na Índia o primeiro biodigestor do mundo na cidade de Bombaim, com a finalidade de se obter gás combustível para um hospital de hanseniosos. Em 1939, o Instituto Indiano de Pesquisa Agrícola, localizado em Kampur, desenvolveu a primeira usina de gás de esterco na cidade de Benagali Gobar, dando origem em 1950, à Gobar Gas Institute. Com isso, houve a difusão do biodigestor como forma de tratar o esterco, e obter gás combustível e fertilizante. Foram construídos mais de meio milhão de biodigestores no interior da Índia, ficando este conhecido como "modelo indiano". O modelo indiano foi o primeiro biodigestor em regime contínuo de alimentação.

Na China, o estudo com o biogás começou em 1900, sendo difundido o uso de biodigestores entre os anos de 1929 e 1930. Em 1930, foi fundada a Primeira Companhia de Biogás em Xangai. Na década de 1950, a China iniciou seu programa de instalação de biodigestores, voltado principalmente para produção de energia, devido à Guerra Fria e a escassez de lenha, utilizado como fonte de energia. Anos mais tarde, com o aumento populacional, aliado à crescente necessidade de aumento da produtividade agrícola, os chineses começaram a utilizar o biodigestor para intensificar a produção de biofertilizante. Em 1972, a China possuía 7,2 milhões de biodigestores implantados, sendo localizados em maior número ao sul do Rio Amarelo, onde as condições climáticas favoreciam a produção de

biogás. Estima-se que na década de 1980 o número de biodigestores chineses tenha alcançado a marca de 10 milhões de unidades, gerando uma nova concepção de biodigestor conhecido como "modelo chinês". Neste cenário, o uso de biodigestores na China era voltado principalmente para a produção de energia e sanitização da região.

Pelo mundo o uso de biodigestores ficou obsoleto principalmente pós Segunda Guerra Mundial, devido ao petróleo, que passou a ser uma fonte de energia abundante e barata. Entretanto com a crise do petróleo na década de 1970, que trouxe elevação e instabilidade no preço diário do petróleo, alguns projetos de biodigestores foram resgatados e outros foram redirecionados para o aumento da produção de gás, voltados para a geração de energia. Entretanto, devido à falta de divulgação dos conhecimentos adquiridos para as construções mais eficientes, houve altas taxas de insucessos com vários biodigestores.

Segundo Oliver *et al.* (2008) no Brasil a introdução de biodigestores ocorreu na década de 1970, incentivado também pela crise do petróleo. Em 1979, com a assinatura do convênio entre o Ministério de Minas e Energia e o Ministério da Agricultura, houve a criação da EMPRESA DE ASSISTÊNCIA TÉCNICA E EXTENSÃO RURAL (EMATER) que possuía um programa de incentivo ao uso do biogás em propriedades rurais. Na década de 80, a EMATER implantou cerca de 200 biodigestores em propriedades rurais no estado da Paraíba. De acordo com uma pesquisa realizada em 2008 pelo Núcleo de Energia da Universidade Federal da Paraíba, apenas 4,6% dos biodigestores implantados continuam em funcionamento.

De acordo com a BGS (2014) atualmente podem-se destacar no mundo alguns projetos de produção e utilização de biogás para a geração de energia. No estado de Saxônia-Anhalt (leste da Alemanha), está localizado a usina de Könnern, segunda maior do mundo, que em parceria com 30 agricultores e pecuaristas locais, recolhem cerca de 120 mil toneladas por ano de dejetos bovinos, suínos, bagaço de cana de açúcar e milho para a produção de biogás. Todos os dejetos são dispostos em 16 grandes biodigestores, com 6 metros de altura e 25 metros de diâmetro. Para cada tonelada de dejetos orgânicos são produzidos 125 m³ de biogás, que posteriormente é tratado (eliminação de gases ácidos e demais impurezas) e distribuído através de redes canalizadas para casas e indústrias locais, que utilizam o gás para a produção de energia elétrica e para sistemas de calefação. Operando desde 2009, a usina de Könnern, fornece cerca de 15 milhões de m³ de biometano (biogás tratado, ou seja, livre de impurezas) por ano, o que corresponde a 17 MW de energia.

Desde 2008 a empresa La Farfana, produz 60 mil m³ de biogás provindo do tratamento de 60 % do esgoto de Santiago (Chile). Após ser produzido pelo processo de biodigestão, o biogás é conduzido por um gasoduto até a central de purificação, onde o gás sulfídrico é removido com o uso das bactérias *Thibacillus*, e as demais impurezas também removidas. Posteriormente o biogás rico em metano é distribuído para indústrias e residências. Cerca de 10 % da demanda energética providas do gás natural no Chile é suprida pelo biogás produzido pela empresa.

Ainda de acordo com a BGS (2014), em Israel, a usina de Be'er Tuviya, inaugurada em 2012 é responsável por coletar dejetos agropecuários oriundos de propriedades rurais no entorno da usina e tratá-los corretamente. A região próxima da usina possui inúmeras propriedades rurais que destinavam incorretamente dejetos de animais e rejeitos agrícolas, depositando em rios ou diversos locais, o que causava problemas de poluição ambiental, de mau cheiro e de doenças. Os dejetos são coletados das propriedades e transportados até a usina através de containers, onde passam por um processo de pasteurização e posteriormente dispostos em tanques de concretos hermeticamente vedados, ocorrendo a biodigestão e a produção de biogás. O biofertilizante produzido é fornecido de volta aos proprietários rurais, como forma de compensação da parceria. Em 2013, estavam sendo tratados aproximadamente dejetos de 14 mil vacas e 15 % dos dejetos de frango produzidos na região.

Em 2007 entrou em operação na Austrália, a usina de Tatura, que produz biogás provindo do sistema de tratamento de esgoto. O biogás produzido é canalizado e tratado, com compostos ferrosos, e depois distribuídos para geradores de eletricidade, onde produzem cerca de 5 GWh de energia por ano.

No Quênia, os biodigestores estão sendo instalados, com o objetivo de coletar e tratar dejetos humanos que antes eram dispostos incorretamente. O biogás produzido por estes biodigestores espalhados pelo país é utilizado para o cozimento de alimentos, diminuindo assim, a dependência da lenha como fonte energética no preparo de alimentos.

Segundo a BSG (2014) na Costa Rica, em 2011, a empresa Chiquita Brands Inc., uma das maiores do mundo no processamento de frutas, instalou na cidade de Guapiles, um biodigestor que recolhe a água de lavagem da indústria e restos de frutas para a produção de biogás destinado à geração de energia elétrica para abastecer a própria indústria.

Na China, a usina de Beijing Yanqing Deqingyuan Eco-Garden 2, recebe diariamente 212 toneladas de dejetos de aves, e produz o equivalente a 14 GWh por ano de energia

elétrica, além de fornecer biogás para diversas residências locais. O distrito de Yanqing possui a maior concentração de criadores de frango. A usina foi implantada pelo governo local com o objetivo de destinar corretamente os dejetos da criação de aves e gerar energia de maneira limpa. Os dejetos das aves são misturados com água provindo do próprio processo de criação e armazenados em duas lagoas com capacidade de 90.000 m³. Em seguida é encaminhado para quatro biodigestores anaeróbicos de 3.000 m³ cada, que operam a 38°C, o biogás então é recolhido e purificado. A usina produz cerca de 7 milhões de m³ de biogás, que são utilizados em dois geradores de 1.064 kW. Além da energia elétrica produzida, o calor do processo é reaproveitado para aquecer os biodigestores no inverno. O processo gera cerca de 180 mil toneladas de biofertilizante por dia, que são destinados às propriedades locais que produzem ração animal.

No início de 2013, nos estado da Califórnia (EUA), foi inaugurada a usina de biodigestão de Sacramento, que recebe diariamente 25 toneladas de restos de alimentos, vindos de supermercados, restaurantes e indústrias. Este material orgânico coletado passa pelo processo de biodigestão e se transforma em biogás, eletricidade e fertilizante agrícola. A tecnologia utilizada nos biodigestores é pioneira, pois dispensa a adição de água à matéria orgânica para que o processo ocorra, reduzindo assim, o tamanho do biodigestor.

2.3.2 Disposição correta dos resíduos provindo da criação bovina em confinamento e vantagens da biodigestão

A criação de animais no sistema de confinamento tem aumentado significativamente no mundo, devido principalmente ao aumento populacional; refletindo na intensificação da demanda de alimentos, principalmente de carnes. Segundo a ASSOCIAÇÃO NACIONAL DOS CONFINADORES (2013, *apud* ACRISSUL 2013), o Brasil possui um rebanho de cerca de 3,5 milhões de cabeça de gado de corte criados no sistema de confinamento.

O confinamento consiste em criar animais distribuídos em pequenos lotes, através de piquetes ou currais com área restrita, onde a água e o alimento são fornecidos pelo cocho. Técnica comumente utilizada na fase de terminação do bovino, mas também muito utilizado nas épocas de seca e entressafra da produção de carne. O sistema de confinamento possui as seguintes vantagens:

- ✓ Aumento da eficiência produtiva do rebanho, por meio da redução da idade ao abate e melhor aproveitamento do animal produzido.
- ✓ Liberação de áreas utilizadas para pastagens (recomenda-se utilizar de 15 a 30 m² por animal).
- ✓ Uso eficiente da mão de obra, maquinários e insumos.

Devido à quantidade de animais presentes em um pequeno espaço, a concentração de dejetos e resíduos oriundos deste tipo de sistema de criação é grande. Exigindo assim, muita atenção, monitoramento e cuidados na disposição final dos resíduos oriundos deste sistema. Segundo Campos (2001), os prejuízos ambientais causados pelo manejo incorreto e a falta de tratamento dos dejetos da criação de animais são incalculáveis. Em muitos países, os efluentes provenientes da criação de animais é a principal causa de poluição de recursos e corpos hídricos, chegando a ser mais preocupante do que a poluição causada pelas indústrias. Quando dispostos corretamente, os dejetos orgânicos dos animais deixam de ser poluentes e passam a ser um importante insumo da produção agrícola.

Para Oliver *et al.* (2008), o esterco animal quando disposto incorretamente contribui diretamente para a poluição do solo e da água devido aos compostos nitrogenados, na forma de nitratos, além de causar a poluição do ar, com a liberação de amônia e gás metano. O fósforo muito presente nos dejetos animais pode causar a poluição de corpos de água e de lençóis freáticos.

Já para Gelain (2011), os dejetos orgânicos de bovinos leiteiros quando levados para corpos d'água, reduzem o teor de oxigênio da água, causando a morte de peixes e microrganismos. Isto se deve à alta Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO) dos dejetos. Além disso, pode haver o estímulo de crescimento de plantas aquáticas e a eutrofização dos corpos d'água, devido à presença de nitrogênio, potássio e fósforo na matéria orgânica.

FONSECA *et al.* (2014) afirma que os dejetos bovinos são compostos orgânicos com macro e micronutrientes, com alto teor energético, que proporcionam água, abrigo e temperatura. E são substratos de vários organismos, como também de micro e macrovetores de alta importância sanitária.

Para Neto (1992), os vetores presentes nos dejetos estão associados à transmissão de inúmeras zoonoses, e doenças respiratórias, epidêmicas e intestinais.

As moscas domésticas (*Musca domestica*) e varejeiras (*Chrysomya spp.*) são vetores da febre tifoide, disenteria, poliomielite, entre outras doenças. As moscas domésticas podem transmitir agentes patogênicos como vírus, rickettsias, protozoários, bactérias e helmintos, sejam como hospedeiro intermediário ou transportadores mecânicos. A mastite também pode ser transmitida pelas moscas, causando a queda na produção e qualidade do leite.

De acordo com Amaral *et al.* (2004), as fezes bovinas têm sido identificado como principal reservatório de *Escherichia coli* e de moscas domésticas, sendo esta última um vetor de grande potencial de risco de contaminação para o ambiente, para o gado e para os alimentos. A *Escherichia coli* é uma bactéria simbiótica com a grande maioria dos seres vivos, presente principalmente nas fezes e nos intestinos destes animais. Esta bactéria quando presente em reservatórios de água e em alimentos, que podem ser consumidos por animais e seres humanos, pode causar diversas doenças tais como a mastite em gados; as gastroenterites, meningites, entre outras nos seres humanos.

Alem disso, Gelain (2011), afirma que a contaminação da água pode ocorrer por organismos patogênicos, como a *Salmonella sp.*, que são liberados pela urina e fezes de animais contaminados.

Segundo Downey e Moore (1977), a simples aspersão dos dejetos bovinos em pastagens ou capineiras, possibilita a continuidade do ciclo biológico de nematódeos gastrointestinais, aumentando o potencial de contaminação e colocando em risco a saúde dos animais e dos seres humanos.

Para Sadiyama *et al.* (2008), o esterco fresco, quando aplicado ao solo sem prévia estabilização, pode sofrer aquecimento e inibir a germinação de sementes e o alongamento das raízes vegetais.

Campos (2001) recomenda coletar as fezes de animais criados em confinamento e dispô-los em esterqueiras, ou em biodigestores, ou mesmo em lagoas aeróbicas. A água de lavagem também deverá ser depositada corretamente, e posteriormente utilizada para a fertirrigação.

A compostagem ou biodigestão (aeróbica, anaeróbica ou mista) da matéria orgânica não produz mau cheiro e nem a proliferação de moscas, além de gerar um adubo orgânico rico em húmus.

Para Freitas (2008), a esterqueira permite a fermentação dos dejetos, diminuindo assim seu poder poluidor, entretanto, necessitam ainda um tratamento posterior em lagoas de

estabilização antes de seu aproveitamento em lavouras, pastagens e pomares. O seu uso se torna uma alternativa de baixo custo no manejo dos resíduos, impedindo que os dejetos percolem ou lixiviem pelo solo, e desta forma atinjam cursos de água superficiais ou subterrâneos.

Para cada tonelada de esterco fermentado em esterqueiras, por 60 a 90 dias, equivale a 155 kg de sulfato de amônia, 100 kg de fosfato natural e 40 kg de cloreto de potássio, componentes usualmente utilizados para adubação do solo.

Freitas (2008), propõe que cada animal bovino leiteiro, criado no sistema de confinamento produz diariamente cerca de 40 kg de esterco, e no sistema de semi confinamento 15 kg por dia.

Segundo Vitko (1999, *apud* Gelain, 2011), cada bovino leiteiro, consome cerca de 200 litros de água, durante o processo de ordenha, seja na higienização dos animais, na limpeza dos equipamentos e no armazenamento de leite. Já pra Cronk (1996, *apud* Gelain, 2011), o consumo de água de uma fazenda leiteira pode variar de 40 a 600 litros, por animal, conforme o tipo de manejo adotado.

Para Berni (2011), o uso de biodigestores está totalmente ligado na correção dos problemas ambientais e sanitários do meio rural, com resultados satisfatórios e rápidos, pois os dejetos ao passar da caixa de entrada para a caixa de saída do biodigestor eliminam o efeito poluente do material e reduz a quantidade de coliformes, ovos e larvas de endoparasitos infectantes.

Salomom (2007) define como Tempo de Retenção Hidráulica (TRH), como sendo o tempo necessário para que a massa orgânica seja digerida no digestor, ocorrendo também o aumento da produção de biogás, até atingir a máxima produtividade de gás. A quantidade máxima de biogás produzido depende do tipo de substrato, do tipo de biodigestor e de demais fatores que influenciam na biodigestão, podendo variar de 50 dias em alguns tipos de biodigestores rurais, ou apenas algumas horas em biodigestores industriais. O TRH demonstra a eficiência do biodigestor, sendo que, quanto maior a quantidade de matéria orgânica digerida e menor o tempo de retenção, mais eficiente será o biodigestor. O tempo de retenção é definido pela relação entre o volume do biodigestor e o volume da carga diária, e pode variar em função da adição de nutrientes, pela agitação ou mesmo pela variação de temperatura da mistura no interior do biodigestor. O TRH contribui também, para a diminuição do volume de matéria seca retirada após o processo de digestão anaeróbico.

Em seu estudo Amaral *et al.* (2004), verificou estatisticamente a redução de coliformes fecais e totais, além de agentes patogênicos presentes no efluente após 20, 30 e 40 dias de TRH em biodigestores modelo chinês e indiano, de dejetos orgânicos provindo de bovinos leiteiros. Para os autores, um TRH de vinte dias é suficiente para reduzir em 99% o número de bactérias de coliformes fecais e totais do efluente. Entretanto, observou-se que quarenta dias de TRH, são insuficientes para a eliminação de helmintos e nematódeos. Vale ressaltar que quanto maior a temperatura do efluente (próximo a 35°C), menor o tempo de sobrevivência da bactéria *Escherichia coli*. Freitas (2008) recomenda um TRH de no mínimo 60 a 90 dias, com temperatura mesofílica, entre 35 e 37°C.

Amaral *et al.* (2004), cita que a biodigestão anaeróbica permite reduzir o potencial poluidor e os riscos sanitários dos dejetos, além de produzir biogás e biofertilizante.

Segundo Cuetos (2008), a digestão anaeróbica tem sido apresentada como uma tecnologia amplamente utilizada e eficiente no tratamento de resíduos orgânicos, resultando na produção de energia renovável através da geração de biogás.

A digestão anaeróbica é uma alternativa interessante no tratamento de resíduos orgânicos, devido aos baixos custos operacionais e por oferecer uma alternativa para substituição de combustíveis fósseis, minimizando a emissão de gases promotores do efeito estufa.

Segundo publicação especializada editada pela TECPAR (2002), a digestão anaeróbica para a produção de biogás possui algumas vantagens:

- ✓ É um processo natural ao tratamento de dejetos orgânicos;
- ✓ Requer menos espaço do que os aterros sanitários;
- ✓ Diminui o volume de resíduos a ser descartado;
- ✓ Reduz significativamente a quantidade de dióxido de carbono e de gás metano lançados diretamente à atmosfera, agravando o efeito estufa;
- ✓ Ao longo prazo, o custo inicial de implantação do processo de biodigestão resulta em uma grande economia, pois reduz os gastos com eletricidade, transporte de botijão de gás e descarte de resíduos.

2.3.3 Modelos de biodigestores

2.3.3.1 Conforme princípio de funcionamento

Para Salomom e Filho (2007), a classificação dos biodigestores varia conforme sua utilização, e pode ser do tipo industrial, urbano ou agrícola.

O tipo do biodigestor a ser selecionado depende muito da disponibilidade de matéria orgânica a ser utilizada, e da necessidade de produção do biogás e do biofertilizante. Além disso, os biodigestores podem também ser classificados conforme seu princípio de funcionamento e alimentação.

- Batelada

O biodigestor do tipo batelada consiste que seu abastecimento ocorra em uma única vez, sendo o biodigestor fechado para que se inicie o processo de biodigestão. Quando a produção de gás cessar, indicará que o ciclo de fermentação da matéria orgânica está completo, sendo assim, o biodigestor é aberto para retirada do biofertilizante, e a realização de sua limpeza e manutenção. Este tipo de sistema é simples e recomendado para pequenas produções de biogás. A Figura 2.3 ilustra esquematicamente um biodigestor que funciona no sistema batelada.



FIGURA 2.3– Sistema descontínuo (batelada) de produção de biogás.
 Fonte: SALOMOM & FILHO (2007)

- Contínuo

O biodigestor do tipo contínuo difere do biodigestor do tipo batelada principalmente na sua construção e operação. Neste biodigestor a matéria

orgânica pode ser depositada diariamente na câmara de biodigestão, sendo retirado em mesma proporção o biofertilizante. Desta forma, pode-se obter biogás e biofertilizante de maneira contínua.

Os parâmetros como pH, temperatura, qualidade do efluente, produção e qualidade do biogás devem ser monitorados, e corrigidos se necessário para que haja estabilização no processo de decomposição. Além disso, no sistema contínuo se faz necessário a agitação da matéria orgânica dentro do biodigestor, evitando assim a deposição da matéria orgânica no fundo, e permitindo a homogeneização na concentração das bactérias e da temperatura. A Figura 2.4, ilustra o diagrama esquemático do sistema contínuo.

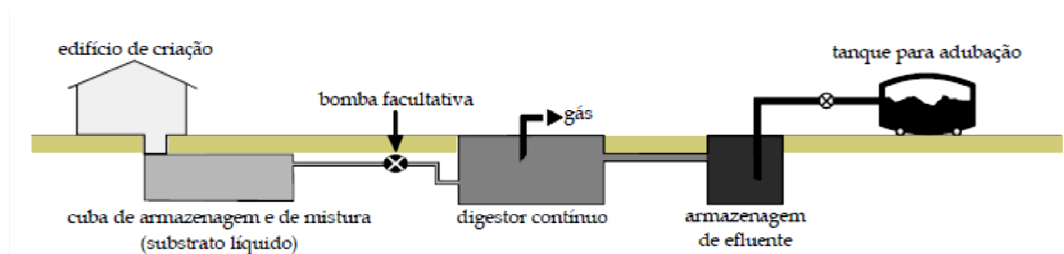


FIGURA 2.4– Diagrama esquemático do biodigestor tipo contínuo.
Fonte: SALOMOM & FILHO (2007)

2.3.3.2 Modelo Indiano

Segundo Berni (2011), o modelo indiano representado pela Figura 2.5 possui uma campânula flutuante como gasômetro, esta vai subindo em torno de uma guia metálica à medida com que o gás vai sendo produzido. O peso da campânula exerce uma compressão no gás armazenado, fazendo com que ele trabalhe com pressão constante, ou permitindo sua regulagem, com a adição de pesos presos na cúpula metálica. Possui também uma parede central que divide o reservatório em duas partes, sendo que há uma tubulação de entrada e outra de saída.

A matéria orgânica entra no biodigestor diretamente no fundo do reservatório, conforme ocorre o processo de fermentação, e a seguir sobe até cair na outra metade da câmara. A parede divisória serve para que ocorra a circulação da matéria orgânica.

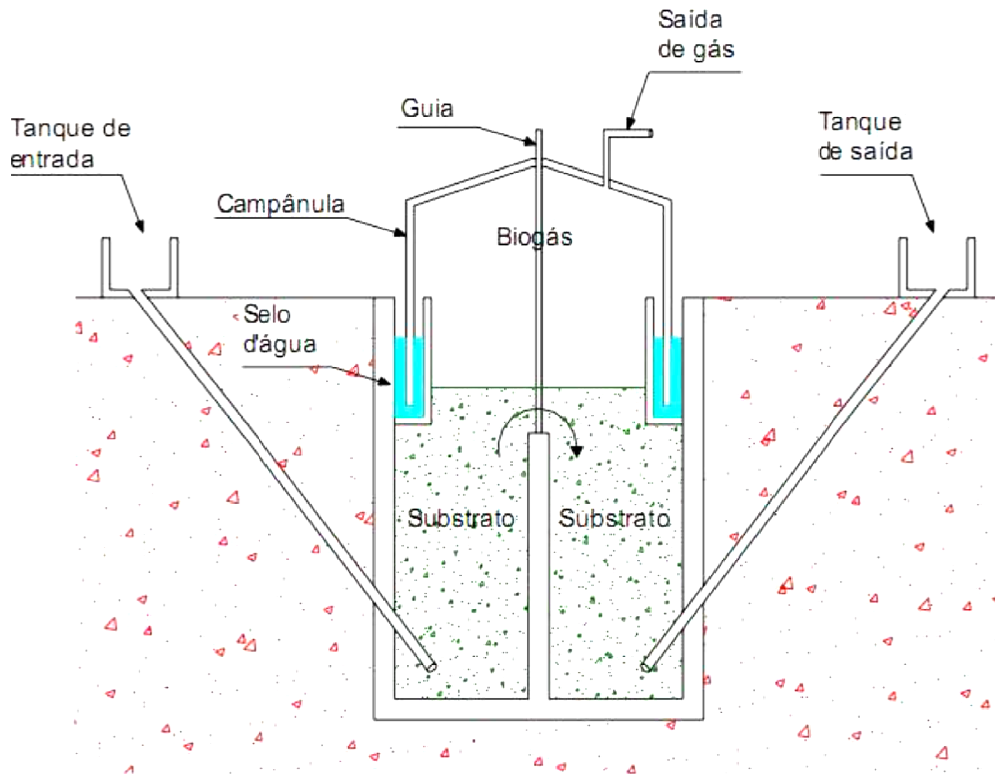


FIGURA 2.5 – Biodigestor modelo Indiano.
Fonte: NISHIMURA (2009)

Para Salomom e Filho (2007), o biodigestor modelo indiano possui as seguintes características:

➤ Vantagens:

- Ocupa pouco espaço do terreno, quando comparado ao modelo Canadense (vide item 2.3.3.4), pois sua maior dimensão é na vertical.
- Sua construção pode ser subterrânea, o que lhe confere boa estabilidade térmica.
- Devido sua construção ser subterrânea, dispensa o uso de reforços, como cintas de concretos.

➤ Desvantagens:

- A cúpula metálica está sujeita a problemas de corrosão, necessitando o uso de materiais inoxidáveis ou de pinturas antioxidante.

- O sistema de comunicação entre a caixa de carga e o digestor é constituído basicamente de tubos, que estão sujeitos ao entupimento.
- Sua construção é limitada para áreas com lençol freático alto, pois pode ocorrer infiltração.

O biodigestor modelo indiano é constituído pelos seguintes componentes:

- ✓ Tanque de entrada - local onde é depositado o material orgânico diluído em água.
- ✓ Câmara cilíndrica - local onde ocorre a fermentação da matéria orgânica.
- ✓ Campânula móvel - local onde fica depositado o biogás produzido.
- ✓ Eixo guia - suporte da campânula.
- ✓ Tubulação de saída do biogás - saída do biogás para local de consumo ou armazenamento.
- ✓ Selo d'água - impede a perda do biogás e possível entrada de oxigênio.
- ✓ Tanque de saída - local de retirada do biofertilizante e efluente mineralizado.

2.3.3.3 *Modelo Chinês*

Segundo Berni (2011) o modelo chinês representado pela Figura 2.6 é mais simples, sendo todo construído em alvenaria, tem o corpo em formato cilíndrico com o fundo e o teto em formato de abóboda, o que dificulta um pouco a sua construção. Utiliza-se de uma cúpula fixa, dispensando o uso de gasômetro móvel, e evitando assim, o uso de chapas de aço. Desta forma o biogás fica armazenado no interior do biodigestor, necessitando a retirada do biogás com mais frequência, e evitando desta forma seu desperdício. Salomom e Filho (2007) citam as seguintes características do biodigestor modelo chinês:

➤ **Vantagens:**

- Este modelo possui um custo mais barato, quando comparado aos demais modelos, pois sua cúpula é feita de alvenaria.
- Ocupa menos espaço na superfície do solo.

- Como é construído completamente enterrado no solo, sofre pouca variação de temperatura.

➤ Desvantagens:

- O sistema de comunicação entre a caixa de carga e o digestor é constituído basicamente de tubos, que estão sujeitos ao entupimento.
- Tem limitação quanto ao tipo de solo, não sendo indicada sua instalação em solos superficiais.
- Não é um biodigestor próprio para o acúmulo de gás, devido a sua construção de cúpula fixa (menor volume de armazenamento).
- É um modelo mais indicado para a produção de biofertilizante.

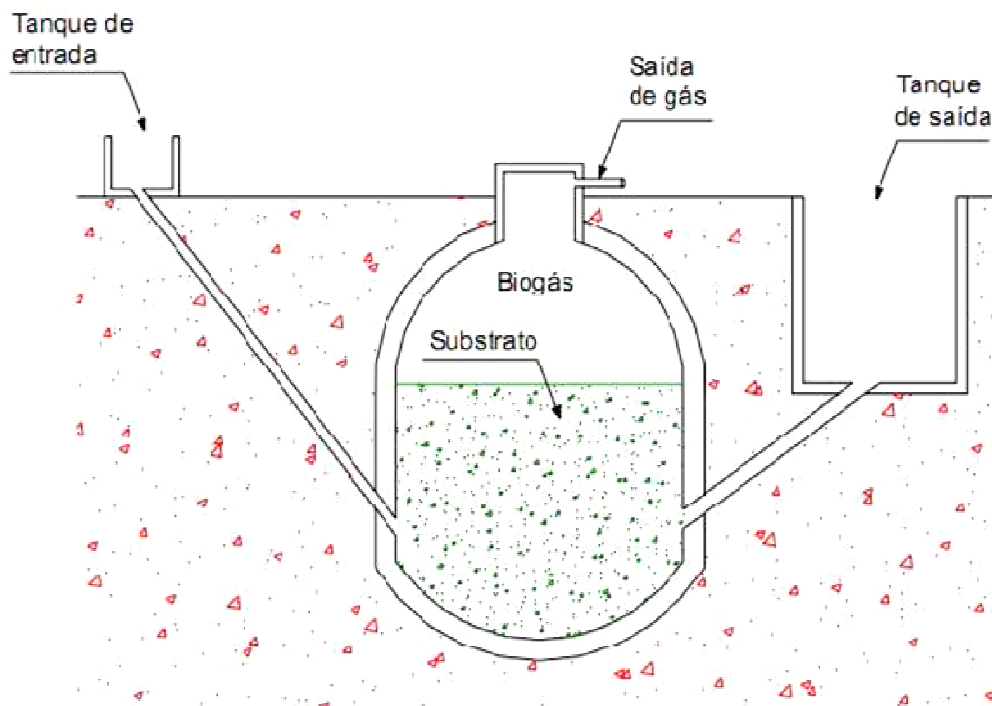


FIGURA 2.6 - Biodigestor modelo Chinês.
Fonte: NISHIMURA (2009)

O biodigestor modelo chinês possui os seguintes componentes:

- ✓ Tanque de entrada - local onde é depositado o material orgânico diluído em água.
- ✓ Câmara de fermentação - local onde ocorre a fermentação da matéria orgânica.

- ✓ Tubulação de saída do biogás - saída do biogás para local de consumo ou armazenamento.
- ✓ Tanque de saída - local de retirada do biofertilizante e do efluente mineralizado.

2.3.3.4 *Modelo Canadense*

Para Berni (2011) o biodigestor modelo Canadense (ou de Fluxo tubular) representado pela Figura 2.7, é caracterizado por possuir uma base retangular onde o substrato é depositado, com a largura maior que a profundidade, fazendo com que haja maior área exposta ao sol, facilitando a produção de biogás. Seu gasômetro é constituído de uma manta flexível, tipo PVC, que infla conforme ocorre à produção de biogás.

Para Salomom e Filho (2007), o biodigestor modelo Canadense possui as seguintes características:

➤ Vantagens:

- Maior área de exposição solar, facilitando a produção de biogás.
- Sua construção não exige restrições quanto ao tipo de solo, não exigindo solos profundos (biodigestor com largura maior que profundidade). Pode ser construído tanto enterrado quanto na superfície do solo.
- A comunicação entre a caixa de carga e o digestor é feito de alvenaria, sendo, portanto mais larga, facilitando a limpeza e, evitando entupimentos.
- Manutenção e limpeza facilitada, graças à remoção da cúpula.

➤ Desvantagens:

- Elevado custo da cúpula.
- A cúpula possui vida útil limitada, requerendo sua substituição após alguns anos de uso.

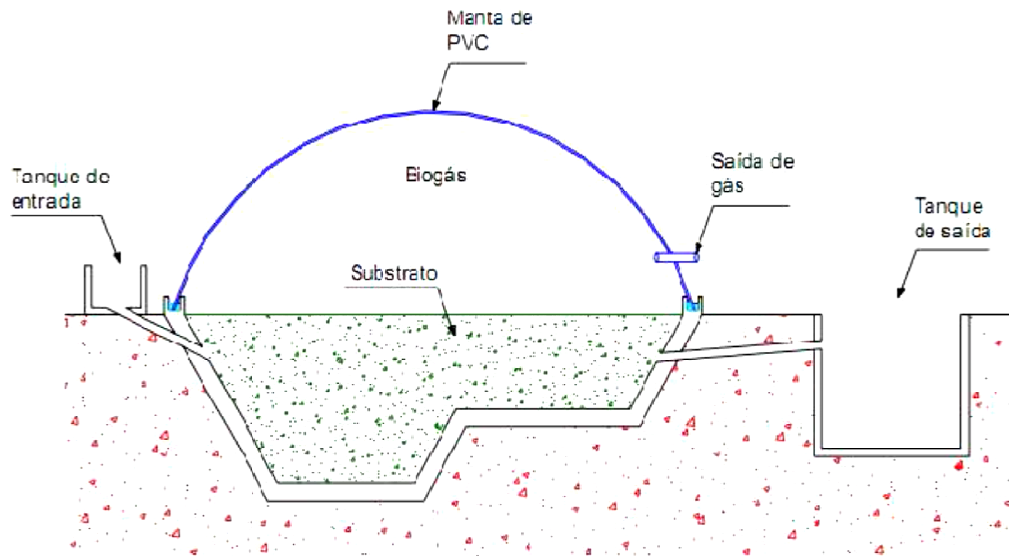


FIGURA 2.7 - Biodigestor modelo Canadense.
Fonte: NISHIMURA (2009)

O biodigestor modelo Canadense possui os seguintes componentes:

- ✓ Tanque de entrada - local onde é depositado o material orgânico diluído em água.
- ✓ Câmara de fermentação - local onde ocorre a fermentação da matéria orgânica.
- ✓ Manta de PVC - local onde o biogás fica armazenado.
- ✓ Selo d'água - impede a perda do biogás e possível entrada de oxigênio.
- ✓ Tubulação de saída do biogás - saída do biogás para local de consumo ou armazenamento.
- ✓ Tanque de saída - local de retirada do biofertilizante e do efluente mineralizado.

2.4 Biogás

2.4.1 Propriedades e uso

O biogás (ou gás dos pântanos) é um combustível natural provindo da decomposição anaeróbica da matéria orgânica. Este gás combustível é uma mistura de diversos gases, sendo predominantes as parcelas de gás metano (CH_4) e gás carbônico (CO_2). O gás metano, principal constituinte do biogás é inodoro, incolor e insípido. A composição do biogás

depende exclusivamente do tipo de matéria orgânica a ser utilizada, das características do biodigestor e das condições climáticas do local. Devido à presença de outros gases, mesmo que em pequenas quantidades, o biogás pode apresentar alguma coloração e um cheiro muito desagradável. O cheiro semelhante ao de ovo podre é proveniente da presença do gás sulfídrico na sua composição. A Tabela 2.1 mostra a composição média dos gases que compõe o biogás.

TABELA 2.1– Composição típica do biogás processado num biodigestor.

Gases	Porcentagem (%)
Metano (CH ₄)	40 a 75
Dióxido de carbono (CO ₂)	25 a 40
Hidrogênio (H ₂)	1 a 3
Nitrogênio (N ₂)	0,5 a 2,5
Oxigênio (O ₂)	0,1 a 1
Gás Sulfídrico (H ₂ S)	0,1 a 0,5
Amônia (NH ₃)	0,1 a 0,5
Monóxido de carbono (CO)	0 a 0,1

Fonte: CASTANÓN (2002)

Dependendo da matéria orgânica e da quantidade de água adicionada a ela, para que ocorra o processo de biodigestão, o biogás produzido pode conter traços de vapor de água em sua composição.

De acordo com Barrera (1983), os dejetos de animais se tornam o melhor alimento para a produção de biogás, pelo fato de já saírem de seus intestinos carregados de bactérias anaeróbicas.

A presença do gás metano, que possui alto poder calorífico, permite que o biogás possa ser utilizado como substituto do gás natural, um combustível fóssil não renovável. Sua queima é limpa e produz uma chama azul clara.

Para a AGÊNCIA EMBRAPA DE INFORMAÇÃO TECNOLÓGICA (AGEITEC, 2014) e para a COMPANHIA PARANAENSE DE ENERGIA (COPEL, 2014), a queima de 1 Nm³ de biogás gera entre 5.000 e 7.000 kcal de energia, esta variação decorre de sua maior ou menor pureza, ou seja, da quantidade de metano presente no biogás. De acordo com

TECPAR (2002), o poder calorífico inferior (PCI) do biogás altamente purificado pode chegar a 12.000 kcal/Nm³.

Barrera (1993) realizou um estudo comparativo do poder calorífico inferior (PCI) de algumas substâncias quando comparados a 1 Nm³ de biogás. A Tabela 2.2 mostra os resultados obtidos em seu estudo.

TABELA 2.2 – Energia equivalente produzido pelo biogás.

1 Nm ³ de biogás, equivale a:	0,61 litro de gasolina
	0,58 litro de querosene
	0,55 litro de diesel
	0,79 litro de etanol
	0,45 litro de GLP
	1,53 quilograma de lenha
	1,43 kW de energia elétrica

Fonte: BARRERA (1993)

Devido ao seu poder calorífico, o biogás representa uma importante fonte energética principalmente em propriedades rurais mais afastadas de centros urbanos ou de redes elétricas. O biogás pode ser utilizado de diversas formas, como em motores de combustão interna, motopicleiras, geladeiras de absorção, resfriadores de leite, para o cozimento de alimentos, secadores de grãos, sistemas de aquecimento de ambientes e de água, geração de vapor de água e geração de energia elétrica. Atualmente vem sendo desenvolvidas tecnologias para seu uso direto em microturbinas para geração de eletricidade. A Tabela 2.3 mostra o consumo de biogás em algumas atividades comuns.

TABELA 2.3 – Consumo de biogás em diferentes utilidades.

Utilização	Consumo
Cozinhar	0,33 Nm ³ /dia · pessoa
Iluminação por lâmpião	0,12 Nm ³ /hora · lâmpião
Chuveiro a gás	0,8 Nm ³ /banho
Incubador	0,71 Nm ³ /m ² de espaço interno · hora
Motor de combustão interna	0,45 Nm ³ /HP · hora
Aquecedor de água a 100°C	0,08 Nm ³ /litro
Geração de energia elétrica (1 kWh)	0,62 Nm ³

Fonte: CETEC (1982)

O biogás possui massa específica inferior à do ar e não é tóxico, tornando sua utilização mais segura, tendo em vista que em caso de vazamentos nas tubulações ou no seu armazenamento, o gás se dispersa rapidamente para a atmosfera. Além disso, também possui um alto ponto de ignição (aproximadamente 537°C) e baixo poder de inflamabilidade, tornando segura sua utilização e seu armazenamento.

A combustão do biogás evita com que haja a liberação do gás metano diretamente para a atmosfera, contribuindo para a diminuição do efeito estufa, já que a molécula de metano retém cerca de 21 vezes mais radiação solar do que a molécula de gás carbônico.

Por ser um combustível provindo de uma fonte renovável, o uso do biogás se ajusta ao Protocolo de Kyoto e ao Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL), já que o carbono resultante da queima do biogás provém de um ciclo fechado. Ou seja, o carbono emitido na combustão é absorvido pelas plantas (para que haja o seu desenvolvimento), e posteriormente utilizado como biomassa ou mesmo como alimento para animais, que irão digerir e gerar dejetos utilizados para a produção de biogás.

Para o CENTRO NACIONAL DE REFERÊNCIA EM BIOMASSA (CENBIO, 2001), a produção de energia elétrica a partir do biogás apresenta as seguintes vantagens:

- ✓ Geração descentralizada e próxima do local de seu uso.
- ✓ Colaboração para a viabilidade econômica do saneamento básico.
- ✓ Redução da quantidade de energia elétrica comprada da concessionária.
- ✓ Possibilidade de eventual venda de energia elétrica excedente à rede.
- ✓ Possibilidade de uso de processos de cogeração, ou seja, a geração de eletricidade tendo como subproduto o calor.
- ✓ Redução do consumo de combustíveis fósseis.

2.4.2 *Tratamento do biogás*

De acordo com Salomom e Filho (2007), a presença de gás sulfídrico (H_2S) no biogás, torna-o corrosivo, sendo, portanto necessário um tratamento antes de seu uso.

Para Salomom (2007), a presença de outros componentes no biogás que não sejam combustíveis, como o vapor de água e o dióxido de carbono prejudica o processo de queima,

tornando o biogás menos eficiente. Isto se deve ao fato, de que tais substâncias absorvem o calor gerado durante a queima do biogás, diminuindo assim seu poder calorífico. Sendo assim, a purificação do biogás fica exclusivamente dependente da finalidade de uso ao qual se destina.

As formas usualmente empregadas na purificação do biogás são:

- ✓ Remoção de umidade - pode ser realizada com o uso de glicóis, de sílica gel, etc.
- ✓ Remoção de dióxido de carbono - a remoção deste gás pode ser realizada por meio de diversos mecanismos como:

i. Absorção física: este método utilizado para a limpeza do biogás é comumente aplicado e efetivo. A facilidade e o baixo custo deste método tornam atrativo até mesmo para baixas produções de biogás. O processo consiste em comprimir o biogás e injetá-lo em uma coluna de absorção no sentido ascendente do leito, enquanto isso, água pressurizada é pulverizada do topo da coluna, em contra corrente ao fluxo de biogás. Desta forma, o dióxido de carbono e o gás sulfídrico são dissolvidos na água sendo coletados no fundo da torre de absorção.

O método de remoção de dióxido de carbono a partir de sistemas de lavagem com água é bastante conhecido em plantas de biogás na Suécia, França e Estados Unidos; sendo obtido biogás com 5 a 10 % de dióxido de carbono ao final do processo.

Para a remoção de gás sulfídrico utiliza-se água como solvente, entretanto possui elevado consumo em relação à pequena quantidade de gás sulfídrico absorvido. Desta forma, recomenda-se adicionar uma solução de hidróxido de sódio para melhorar a eficiência do processo. Os subprodutos formados são sulfetos de sódio que não podem ser recuperados e devem ser tratados antes de sua disposição final.

ii. Absorção química: é um processo que envolve a formação de ligações químicas reversíveis entre o soluto e o solvente. A regeneração do solvente envolve conseqüentemente a quebra destas ligações com a adição de energia. Alguns solventes químicos geralmente utilizados são

soluções aquosas de aminas ou soluções de sais alcalinos como hidróxido de sódio, cálcio ou potássio.

Biswas, Kartha e Pundarikakhadu (1977), afirma que o biogás ao passar por uma solução aquosa a 10% de mono-etanolamina, reduz o teor de dióxido de carbono de 40 % para 0,5 a 1,0 % em volume. A solução aquosa de mono-etanolamina pode ser completamente regenerada fervendo-a por 5 minutos, e desta forma pode ser utilizada novamente.

Nas indústrias, a solução de carbonato de potássio (K_2CO_3) entre 20 a 30 % é comumente utilizada para a remoção de dióxido de carbono. A solução deve permanecer a $110^\circ C$ para que ocorra o processo de absorção e de regeneração.

O gás sulfídrico pode ser removido com a utilização de sais de ferro, como o cloreto de ferro. O gás sulfídrico é adsorvido pelos sais ferrosos, formando precipitados insolúveis. Este processo é recomendado para biodigestores anaeróbicos de pequeno porte, sendo que o biogás pode apresentar concentração final de gás sulfídrico de 10 ppm.

- iii. Adsorção sobre uma superfície sólida: é um processo que envolve a transferência do soluto do gás à superfície de um material sólido, por meio das forças de Van Der Waals. Dependendo do adsorvente utilizado pode-se remover seletivamente ou simultaneamente o dióxido de carbono, o gás sulfídrico, o vapor de água e demais impurezas encontradas no biogás. Alguns dos adsorventes mais utilizados são a sílica, a alumina, o carvão ativado ou silicatos. Este processo possui boa capacidade de remoção de impurezas, constituído de um projeto simples e de fácil operação. Entretanto, devido às altas temperaturas e pressões de trabalhos exigidos, o processo possui um custo elevado.

Para a remoção de gás sulfídrico, utilizam-se pellets de óxidos de ferro ou o carvão ativado. Após serem completamente recobertos por enxofre, podem ser removidos para sua regeneração com o uso de calor. Também podem ser utilizados a alumina, a bauxita, a sílica gel e o carvão vegetal. Entretanto tais materiais são poucos utilizados devido

a problemas ligados à sua regeneração e também devido à adsorção de água, que reduz a eficiência da adsorção dos gases.

- iv. Separação por membranas: o processo consiste em utilizar uma membrana fina (< 1 mm) para reter determinados componentes do biogás e permitir a passagem dos demais.

Rautenbach, Ethresmann e Wayer (1987), utilizaram uma membrana produzida por acetato-celulose para a remoção de impurezas do biogás. O autor obteve bons resultados para a retenção do metano e a passagem de dióxido de carbono, oxigênio e gás sulfídrico para uma temperatura de 25°C e uma pressão de 5,50 bar.

- v. Separação criogênica: este método consiste em separar os componentes do gás por condensação e destilação fracionada à baixa temperatura. Podendo recuperar o componente puro em forma de líquido e transportá-lo. Entretanto possui elevado custo de investimento e operação.
- vi. Remoção de particulados: processo que consiste em remover os particulados e demais impurezas presentes no biogás através de lavadores de gases como o do tipo torre, centrífugos e Venturi.

Segundo TECPAR (2002), uma maneira simples de se remover o gás sulfídrico (H₂S) e o vapor de água, é através da utilização de esponjas ou limalhas de ferro e resíduos de serragem da madeira, formando assim um filtro purificador. O ferro metálico em contato com o gás sulfídrico reage formando sulfeto de ferro. A serragem serve para absorver a umidade e evitar a formação de blocos de ferro no interior do filtro, os quais impediriam a circulação do biogás dentro do purificador.

Para Martins² (2003), a remoção de gás sulfídrico pode ser realizada por meio de uma lavagem com lixívia de hidróxido de potássio (KOH), que resultará em um sal que pode ser adicionado ao biofertilizante para enriquecê-lo de enxofre e potássio.

² <http://www.hydor.eng.br/PAGINAS-P/P21-P.html>

2.4.3 Armazenamento do biogás

De acordo com TECPAR (2002), usualmente o biogás é utilizado em um lugar mais afastado de seu local de produção, o transporte por compressores evita formação de "barriga d'água" nas tubulações causada pela condensação de vapores de água presente no gás. Para distâncias maiores que 500 metros, recomendam-se o uso de compressores de gás, pois o biogás produzido é armazenado em baixas pressões no biodigestor.

Por conter principalmente metano em sua composição, o biogás não pode ser facilmente armazenado e liquefeito, à pressão e temperatura ambiente (temperatura crítica de $- 82^{\circ}\text{C}$ e pressão crítica de 47,5 bar). Alguns métodos de armazenamento do biogás são representados na Tabela 2.4.

TABELA 2.4 - Sistemas de armazenamento de biogás.

Pressão [bar]	Estocagem	Material
Baixa (0,138 a 0,414)	Selo d'água	Aço
Baixa (0,138 a 0,414)	Gás 'bag'	Plástico, vinil, lona (borracha)
Media (1,05 a 1,97)	Tanques de propano e butano	Aço
Alta (200)	Cilindros comerciais de gás	Aço

Fonte: KAPDI (2004)

Salomom (2007) recomenda atenção em relação à entrada de ar, nas etapas de transporte, armazenamento ou tratamento do biogás, pois concentrações de metano entre 5 a 15 % (em volume) e de ar superior a 15 % podem trazer riscos de explosão do biogás. Algumas medidas de segurança quanto ao uso do biogás, podem ser observados a seguir:

- ✓ Evitar vazamentos, utilizando materiais adequados para execução dos reatores, armazenamentos e transporte de gases.
- ✓ Instalação de para-raios.
- ✓ Treinamento regular do pessoal que opera no sistema de tratamento.
- ✓ Sinalização adequada nas áreas de maior perigo.
- ✓ Evitar o aumento de temperatura do biogás nas etapas de transporte e armazenamento.
- ✓ Instalação de equipamentos corta chamas na sucção de gases ou em setores em que se prevê a compressão dos gases.

- ✓ Devem-se prever drenos para a extração de vapores condensados da mistura de gases.
- ✓ Deve se realizar um monitoramento da composição do biogás.
- ✓ Respeitar normas relativas a projeto e sistemas de gases de combustão.

2.4.4 *Potencial de produção do biogás*

Para Santos (2010), o tempo de digestão varia de acordo com a biodegradabilidade de cada resíduo, o que influencia na produção de biogás. O tempo de biodegradabilidade dos resíduos bovinos são maiores quando comparado aos resíduos de outros animais comumente encontrados na pecuária, tais como de suínos e de aves, pois possui maior quantidade de compostos celulósicos e lenhina (lignina), proveniente da alimentação recebida. Além disso, o tempo de biodigestão da matéria orgânica sofre influências de outros fatores tais como: concentração de oxigênio, pH, temperatura, qualidade da matéria orgânica, e a quantidade de água. Coldebella (2006) afirma que se as condições forem adequadas ao desenvolvimento das bactérias anaeróbicas, a digestão se realiza a partir de qualquer matéria orgânica, e com a fermentação provocada pelas bactérias, obtêm-se o biogás.

Para cada tipo de matéria orgânica utilizada, podem-se obter diferentes quantidades de biogás. Oliver *et al.* (2008), propõe as seguintes correlações de potencial de produção de biogás, como observado na Tabela 2.5.

TABELA 2.5 - Potencial de produção de biogás a partir de dejetos animais

Espécie	m³ de biogás/kg esterco
Caprino/ovino	0,040 - 0,061
Bovino de leite	0,040 - 0,049
Bovino de corte	0,040
Suínos	0,075 - 0,089
Frangos de corte	0,090
Poedeiras	0,100
Codornas	0,049

Fonte: OLIVER (2008)

2.5 Benefícios do biofertilizante e do efluente mineralizado.

Segundo Oliver *et al.* (2008), o biofertilizante é um produto natural obtido da digestão anaeróbica de materiais orgânicos, produzido concomitantemente ao biogás. O biofertilizante é um adubo orgânico com grandes qualidades nutricionais para o solo, melhorando suas características físicas, químicas e biológicas. Tornando seu rendimento mais eficaz e realizando um papel de proteção contra pragas e doenças. O biofertilizante contrapõe aos fertilizantes químicos, que alteram o equilíbrio microbiológico do solo, poluindo e tornando-o cada vez mais carente em nutrientes, e conseqüentemente diminuindo sua produtividade ao longo de anos, além de provocar a mineralização do solo, seu ressecamento e endurecimento, dificultando a entrada de água e ar. Outro problema que ocorre é a destruição de microorganismos presente no solo, deixando-o indefeso às invasões de insetos, fungos, nematoides e vírus, que causam prejuízos às plantas. Já o biofertilizante mantém todos os nutrientes que a planta necessita no solo, e melhora a qualidade química, física e biológica do solo.

Para Salomom e Filho (2007), o biofertilizante constitui-se de uma fonte de macro e micronutrientes, principalmente de nitrogênio e fósforo, além de ser isento de mau cheiro, não atraindo moscas e outros insetos, e livre de agentes transmissores de doenças. Os macronutrientes são elementos exigidos em maior proporção (quilos por hectare), sendo eles: nitrogênio, fósforo, potássio, cálcio, magnésio e enxofre. Já os micronutrientes são aqueles que são exigidos em menor quantidade (grama por hectare), tais como: boro, cloro, cobalto, cobre, ferro, manganês, molibdênio, níquel, selênio e zinco.

De acordo com Malavolta (2008), o consumo de adubo está correlacionado ao aumento da população, sendo que o Brasil é o quarto consumidor mundial de adubo, ficando atrás apenas de China, Estados Unidos e Índia. O biofertilizante é um adubo orgânico rico em compostos nitrogenados e em fósforo, sendo seu uso indicado para a adubação de diversas culturas. Em média o biofertilizante possui de 1,5 a 2,0% de nitrogênio, que pode ser absorvido rapidamente pelas plantas; de 1,0 a 1,5% de fósforo, e de 0,5 a 1,0% de potássio, que agem sob o solo corrigindo seu pH. O biofertilizante substitui o uso de adubos químicos, representando desta forma uma economia ao produtor rural. A utilização do biofertilizante deverá ser dosada conforme as recomendações agrônômicas e dentro das legislações em vigor. Segundo Berni (2011) o biofertilizante possui outras características importantes, tais como:

- ✓ Controle de praga e doenças de culturas agrícolas, pois ele age como escudo aos vetores;
- ✓ Aumento da penetração de ar pelos poros, facilitando a respiração pelas raízes das plantas que conseqüentemente obtêm maiores resultados de desenvolvimento;
- ✓ Evita erosões, pois as partículas de solo ficam mais agregadas, absorvendo rapidamente a água;
- ✓ Recuperam solos degradados, aumentando sua qualidade e estrutura, e favorecendo o desenvolvimento das plantas, graças à multiplicação de bactérias;
- ✓ Reduz o poder germinativo de ervas daninhas, reduzindo assim prejuízo ao agricultor;
- ✓ Restabelece o teor de húmus no solo.

Outros benefícios referentes à utilização do biofertilizante podem ser observados, destacando-se:

- ✓ Por possuir um pH próximo a 7,5, o biofertilizante funciona também como corretor da acidez do solo, o que dificulta a proliferação de fungos maléficos à agricultura.
- ✓ O biofertilizante possui grande poder de fixação, mantendo os sais minerais em formas aproveitáveis pelas plantas.
- ✓ Melhora a estrutura e textura do solo, o que facilita o seu manejo e a penetração das raízes vegetais.
- ✓ Intensifica a atividade microbiológica do solo, ajudando a fixação do nitrogênio.

Possui também a capacidade de retenção de umidade do solo, permitindo que a planta se desenvolva durante o período de seca. A biomassa retida no interior do biodigestor elimina todas as bactérias aeróbicas e germes existentes tanto nas fezes, quanto nas demais matérias orgânicas.

A forma de aplicação mais conhecida do biofertilizante é seu uso direto no solo. Mas também pode ser utilizado de outras formas, como no seu uso em folhas, em sementes e em hidroponia. Por ser um efluente líquido, sua aplicação é muito mais eficiente quando comparado ao adubo sólido, tornando sua absorção pela planta mais rápida, e com isso

podendo nutrir a planta mais rapidamente. Seu uso é muito indicado em culturas de hortaliças, pois são plantas que necessitam de nutrientes rapidamente.

Salomom e Filho (2007) ressaltam que o biofertilizante e o efluente deverão receber um pré-tratamento antes de ser utilizada para a fertirrigação, com o objetivo de eliminar possíveis microrganismos patogênicos existentes, evitando desta forma a contaminação dos alimentos ou do lençol freático. Isto permite instalar o tanque mais próximo possível do cultivo, permitindo melhor manejo e com menor custo, tanto de energia elétrica como de operação.

Coldobella (2006) resalta que o biofertilizante depois de desidratado pode ser utilizado para dar volume à composição de rações de animais e de peixes.

2.6 Microturbina

As microturbinas são turbinas de combustão de pequeno porte que podem fornecer potências na faixa de 10 a 500 kW. Operam com elevada velocidade de rotação, podendo alcançar 120.000 rpm, e podem ser adaptadas para operarem com os mais diversos tipos de combustíveis. A maioria das microturbinas opera com uma pressão de combustível que varia de 3,5 a 8,5 bar. As microturbinas são compostas basicamente de um compressor, que é responsável pela elevação da pressão do ar e pelo aumento da quantidade de ar injetado na câmara de combustão; da câmara de combustão, local onde ocorre a mistura do ar a alta pressão e do combustível, e posterior reação química de oxidação exotérmica (combustão); da turbina, onde ocorre a expansão dos gases resultantes da combustão e a realização de trabalho mecânico útil; e de um regenerador ou recuperador de calor, cuja função é pré aquecer o ar do compressor, antes de sua entrada da câmara de combustão. De acordo com Coloma e Prieto (2010), o regenerador é um dos principais equipamentos que diferencia as microturbinas das turbinas convencionais, além de melhorar seu rendimento. As Figuras 2.8 e 2.9 ilustram esquematicamente microturbinas a gás.

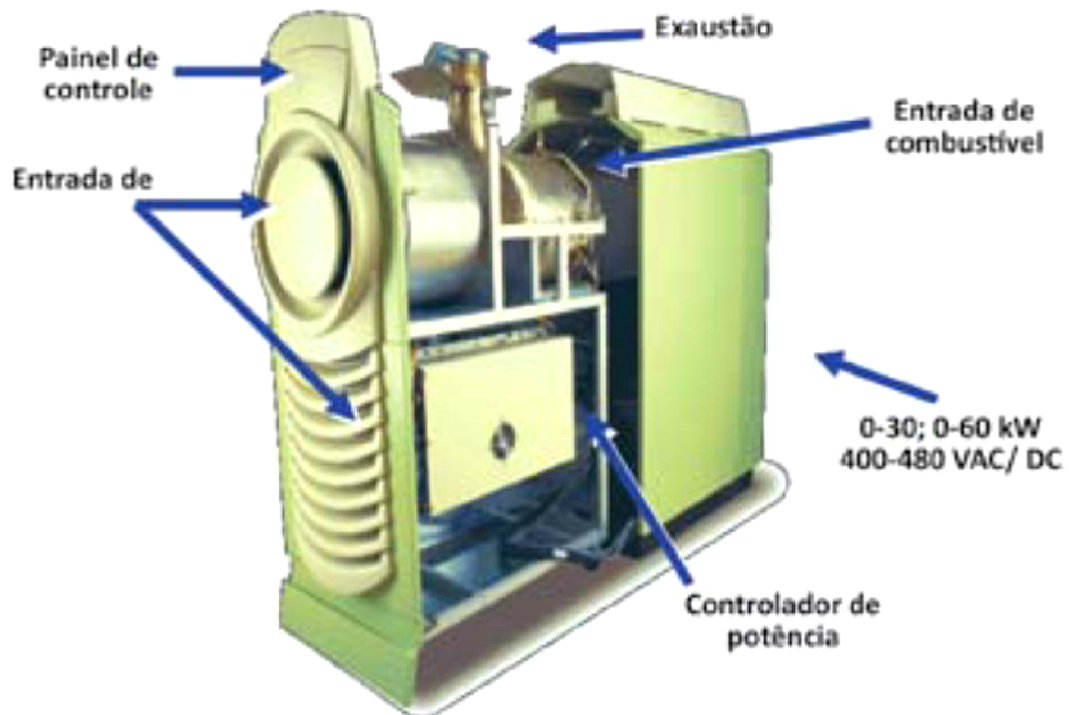


FIGURA 2.8 - Desenho esquemático de uma microturbina à gás.
 Fonte: MONTEIRO (2004)

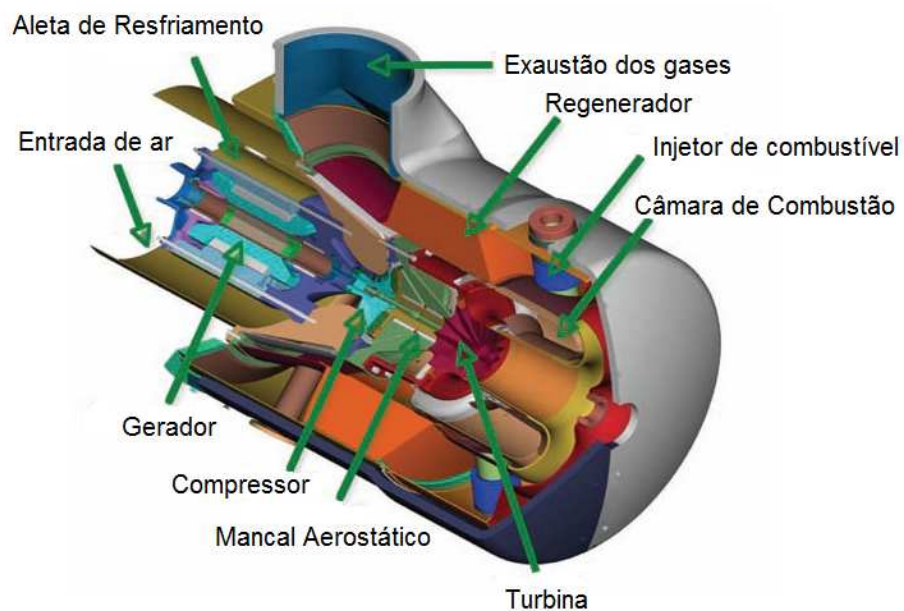


FIGURA 2.9 - Microturbina Capstone C60.
 Fonte: CAPSTONE (2014)

O princípio de funcionamento das microturbinas é atualmente bem compreendido, e se baseia no ciclo termodinâmico de Brayton, que é um ciclo aberto. A Figura 2.10 representa o diagrama esquemático do ciclo termodinâmico de uma microturbina a gás.

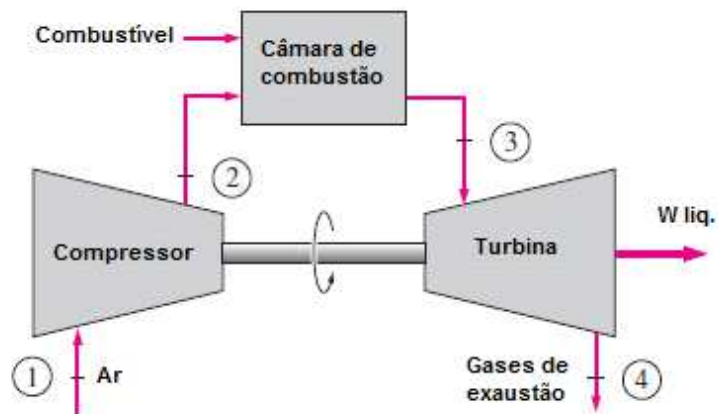


FIGURA 2.10 - Diagrama esquemático de uma microturbina a gás.
 Fonte: ÇENGEL & BOLES (2007)

No diagrama esquemático acima, o compressor é responsável pela elevação da pressão do ar desde a sua admissão até a câmara de combustão. O trabalho de compressão faz com que a temperatura do ar se eleve. Em alguns casos, devido às elevadas pressões de trabalho da microturbina, o compressor pode ser dividido em várias seções utilizando-se resfriamento intermediário. O resfriamento reduz o trabalho requerido pelo compressor.

O ar comprimido a alta temperatura é então entregue através de um difusor para a câmara de combustão, onde o combustível é injetado e queimado a pressão constante, aumentando a temperatura dos gases. O difusor reduz a velocidade do ar para valores aceitáveis na câmara de combustão. Na prática, existe uma perda de carga através da câmara de combustão, que está na ordem de 1 a 2 %. A combustão acontece com uma considerável quantidade de excesso de ar que dilui e reduz a temperatura dos produtos da combustão. Os gases provenientes da câmara de combustão podem exceder a 1.260 °C (1.533 K) de temperatura, e podem ter concentração de oxigênio de até 15 ou 16 %.

Os gases a alta temperatura e pressão provenientes da câmara de combustão são então entregues para a turbina. Na turbina, a energia dos gases de exaustão é convertida em energia cinética, que é convertida em energia mecânica. Como o compressor e a turbina estão ligados no mesmo eixo, parte da energia mecânica é transferida para acionar o compressor, e o restante, é utilizado para mover o gerador elétrico síncrono de ímã permanente (pode se utilizar também geradores de corrente contínua ou geradores de indução), que geram energia elétrica com alta frequência (1.600 Hz). Um retificador e inversor são utilizados para obter tensão e frequência elétrica comumente utilizada pelas redes de distribuição.

A energia gerada na microturbina pode ser armazenada em baterias, supercapacitores ou mesmo em volantes de inércia, desta forma a energia pode ser fornecida para atender uma abrupta alteração da demanda de carga do sistema.

Os gases de exaustão da turbina são consideravelmente mais frios que os gases provenientes da câmara de combustão e estão na faixa de 454 a 593 °C (727 a 866 K).

Após se expandir na turbina, os gases de exaustão podem ser utilizados em um regenerador antes de serem expelidos para a atmosfera. No regenerador os gases de exaustão passam por um trocador de calor com o objetivo de aquecer o ar de entrada da câmara de combustão (saída do compressor), e com isso melhorar a eficiência do processo. A Figura 2.11, mostra um diagrama esquemático de uma microturbina com regenerador.

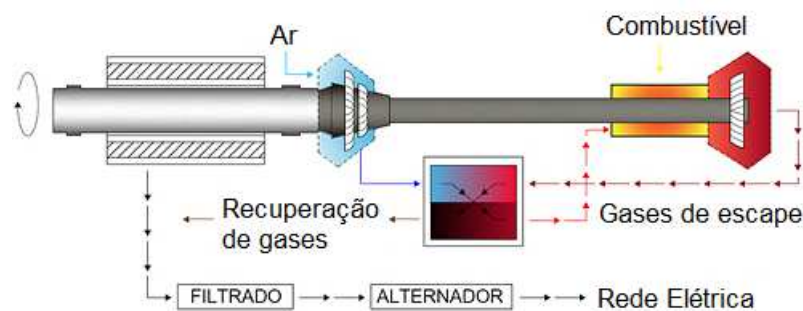


FIGURA 2.11 - Microturbina com regenerador.
Fonte: MULTITEK (2014)

Dentre os benefícios apresentados na utilização de microturbinas, destacam-se as baixas emissões atmosféricas, baixos níveis de ruído e vibração, flexibilidade de combustível, dimensões reduzidas e simplicidade de instalação, podendo ser instalada em locais cobertos ou ao ar livre (HAMILTON, 2003).

De acordo com Coloma e Prieto (2010), o sistema de refrigeração da microturbina funciona a ar, podendo-se utilizar de mancais aerostáticos (ou pneumáticos) com o que se elimina o uso de líquidos lubrificantes, reduzindo também tempo de manutenção. Devido ao gerador elétrico operar com a mesma velocidade da turbina, a microturbina dispensa o uso de caixas redutoras de velocidades, reduzindo assim, o peso do equipamento e as partes móveis do sistema. Segundo a CAPSTONE (2014) a única peça móvel de suas microturbinas é o eixo no qual está acoplado o microgerador de ímã permanente, o compressor de ar centrifugo e a turbina de expansão dos gases, representado pela Figura 2.12.



FIGURA 2.12 - Representação do eixo móvel de uma microturbina.
Fonte: CAPSTONE (2014)

Por ser a única peça móvel do sistema, necessita de pouca manutenção, sendo que a primeira manutenção preventiva requerida pelo sistema pode ser feita após 40 mil horas de funcionamento da microturbina, resultando-lhe em uma elevada confiabilidade.

Segundo Coloma e Prieto (2010), uma característica intrínseca das microturbinas é a capacidade de emitir baixos níveis de poluentes, com índices inferiores a 9 ppm. Os poluentes mais comuns são os NO_x (óxidos de nitrogênio), CO_2 (dióxido de carbono), CO (monóxido de carbono), SO_2 (dióxido de enxofre) e hidrocarbonetos. A presença do NO_x é devido às elevadas temperaturas de combustão da mistura de gases pobre em metano, e também devido ao nitrogênio presente no ar atmosférico. O monóxido de carbono e os hidrocarbonetos são provenientes da combustão incompleta, causada pelo baixo tempo de residência da mistura ar-combustível na câmara de combustão.

O rendimento elétrico das microturbinas varia entre 15 a 33%, entretanto seu rendimento global pode alcançar 83%, mediante o aproveitamento energético dos gases de escape, tanto com o uso de regeneradores, utilizados para pré aquecer o ar de entrada na câmara de combustão, seu uso em sistemas de aquecimento de água e produção de vapor, ou mesmo sistemas de refrigeração por absorção.

De acordo com Coloma e Prieto (2010), as microturbinas são equipamentos muito interessantes para aplicações onde se dispõe de pequenas reservas de biogás. Outra característica interessante é que se pode trabalhar com biogás pobre em gás metano, com uma quantidade mínima de 35 a 40%. Segundo a CAPSTONE (2014), as microturbinas atuais, principalmente o modelo CR30 de sua linha, pode operar com biogás com altos níveis de contaminantes, como o gás sulfídrico (H_2S). Seu equipamento pode operar com níveis de gás sulfídrico próximo a 70.000 ppm, ou seja, 175.000 mg/Nm^3 , muito adequado para receber biogás proveniente da decomposição anaeróbica.

2.6.1 *Conexão com a rede elétrica e conversores de potência*

As microturbinas podem funcionar alimentando uma carga isoladamente ("stand-alone") ou ligadas na rede de distribuição elétrica ("grid-connected"). Quando ligados em "stand-alone" os controles da microturbina regulam somente a tensão (magnitude e frequência) na carga, ou seja, o inversor funciona como uma fonte de tensão (BONA e FILHO, 2004)

Segundo os mesmos autores, quando operado em "grid-connected" a microturbina funciona como uma fonte de corrente, que ligado na tensão da rede produz potencia ativa (fator de potência unitário) de acordo com a determinação do operador da máquina. Casos determinados níveis de tensão ou de frequência sejam ultrapassados ou uma condição de ilhamento se apresente, a microturbina se desconecta automaticamente da rede.

Uma das características mais desejadas nas microturbinas seria a capacidade de transição direta e automática do modo "grid-connected" para o modo "stand-alone". Assim, no caso da interrupção do fornecimento de energia pela rede de distribuição, a microturbina se desconectaria da rede e continuaria a fornecer energia para o consumidor. Contudo, a maioria das microturbinas não faz essa transição diretamente, sendo necessário primeiro desligá-las para só depois reiniciá-las em outro modo de operação, processo que demora pelo menos 3 minutos. A INGERSOLL-RAND é a única fabricante que possui microturbinas com transição direta de "grid-connected" para "stand-alone". (HAMILTON, 2003)

De acordo com Bona e Filho (2004), a eletrônica de potência presente na microturbina dispensa o uso de motores de partida para que se inicie seu funcionamento. Desta forma, o gerador elétrico realiza a função do motor de partida, que ao receber a energia através do conversor CC/CA-CA/CC, acelera o eixo da turbina até a velocidade necessária para ela partir.

As microturbinas não necessitam trabalhar em uma faixa fixa de velocidade, isto permite um ajuste das diferentes condições de carregamento de modo a obter uma operação mais eficiente e com menor desgaste do equipamento.

Além disso, podem ser ligadas em paralelo uma à outra, sem a necessidade de equipamentos adicionais.

2.6.2 *Aproveitamento Energético*

O uso do biogás para a produção de energia elétrica em microturbinas é viável tecnicamente e economicamente, quando se dispõe de quantidades suficientes de biogás para manter o funcionamento contínuo da microturbina, possibilitando assim, a produção e a comercialização de créditos da energia produzida.

Devido à flexibilidade de combustíveis, a microturbina pode ser abastecida com biogás de baixo poder calorífico, para isso necessita de uma remodelação para a queima de um gás pobre. Em especial, modifica-se a câmara de combustão (aumento das dimensões), e realiza-se a limpeza do biogás antes da sua queima.

2.6.3 *Panorama de Uso das Microturbinas*

Segundo Coloma e Prieto (2010), as primeiras microturbinas foram desenvolvidas por volta da década de 1970, com tecnologia provinda das indústrias aeronáuticas e militares, mas somente na década de 1990, foram desenvolvidas as primeiras microturbinas comerciais.

Na Europa o uso das microturbinas movidas a gás natural para a geração de energia elétrica é mais difundida. Entretanto, existem algumas experiências com o intuito de substituir o gás natural pelo biogás provindo da decomposição anaeróbica do tratamento de esgoto.

O uso do biogás provindo da decomposição de dejetos agropecuários ainda é pouco explorado.

Em 2001, no estado da Califórnia (EUA), foi realizada a primeira experiência com microturbinas utilizando-se biogás oriundo de dejetos pecuários.

Ainda de acordo com Coloma e Prieto (2010) em 2004 nos Estados Unidos, foi realizado um projeto que demonstrou a viabilidade de produção de energia elétrica com microturbinas abastecidas com biogás provindo da digestão anaeróbica de dejetos agrícolas. Na Suécia e na Alemanha, estão sendo realizados estudos com uma planta piloto de microturbinas movidas a biogás oriundo de dejetos agroindustrial.

A empresa *Greenenvironment* localizada na Finlândia é pioneira na instalação de plantas de microturbinas movidas a biogás provindo de dejetos orgânicos agropecuários. Somente na

Alemanha, existem 14 plantas de microturbinas operando com biogás proveniente da decomposição de dejetos agropecuários, totalizando cerca de 4,2 MWh de energia.

De acordo com Hamilton (2003), o biogás produzido pela decomposição da matéria orgânica do aterro sanitário de Lopez Canyon, em Los Angeles (EUA), é tratado e utilizado para alimentar 50 microturbinas de 30 kW que operam em paralelo, sendo considerada a maior planta de microturbinas já instalada.

No Brasil está em execução o projeto da Estação de Tratamento de Esgoto (ETE) da COMPANHIA DE SANEAMENTO BÁSICO DO ESTADO DE SÃO PAULO (SABESP), localizada em Barueri na grande São Paulo, em parceria com o CENBIO. Trata-se de uma planta piloto visando o aproveitamento do biogás como combustível em microturbinas a gás para a geração de energia elétrica. Os primeiros levantamentos indicaram uma produção média de 24.000 m³ (tratamento secundário) por dia de biogás chegando a 28.000 m³ em alguns períodos, com um PCI de 5.300 kcal/Nm³ (22,2 MJ/Nm³), (COELHO, 2004).

Segundo a ECOGEO (2012), o Brasil possui uma microturbina instalada no município de Oliveiras em Minas Gerais, na fazenda São Paulo, para a produção de energia elétrica.

2.6.4 *Microturbina específica para biogás*

A fabricante CAPSTONE possui uma linha de microturbinas adaptadas especialmente para serem abastecidas com biogás. Esta linha de produtos foi desenvolvida para receber o biogás da decomposição anaeróbica, ou seja, biogás com baixo teor de gás metano e altos níveis de contaminantes, como o ácido sulfídrico. A seguir são ilustradas na Figura 2.13, e na Tabela 2.6 respectivamente, as especificações de uma microturbina CAPSTONE que pode ser abastecida diretamente com biogás.



FIGURA 2.13 - Microturbina Capstone CR30
Fonte: CASPTONE (2014)

TABELA 2.6 - Especificações técnicas da microturbina CAPSTONE CR30.

Microturbina CR30	
Performance Elétrica	
Potência elétrica produzida	30 kW
Tensão	400 - 480 VAC (trifásico - 50/60 Hz)
Máxima corrente Produzida	36 A
Eficiência elétrica	26%
Características do Combustível	
Biogás de biodigestor ou aterros sanitários	13 - 32,6 MJ/m ³
Concentração de H ₂ S	< 70.000 ppm
Pressão de entrada	414 - 483 kPa
Vazão de biogás	457 MJ/h
Característica dos Gases de Exaustão	
Emissão de NO _x	< 9 ppm (18 mg/m ³)
NO _x /produção energética	~ 0,29 kg/MWh
Fluxo dos gases de exaustão	0,31 kg/s
Temperatura dos gases de exaustão	275 °C
Dimensões	
Largura x Profundidade x Altura	0,76 x 1,5 x 1,8 [m]
Peso	405 kg
Níveis de ruído a 10 m	65 dBA

Fonte: CAPSTONE (2014)

2.7 Benefícios do uso do biogás em microturbinas, cogeração e trigeração.

A geração distribuída de energia têm se mostrado uma solução eficiente e confiável para a crescente demanda energética no mundo, principalmente para as regiões mais afastadas dos locais de geração e distribuição de energia elétrica, além de contribuir para a ampliação da potência de reserva ou emergencial, para a minimização do pico de carga, e para o atendimento de comunidades isoladas.

A energia gerada nas microturbinas (em sua totalidade ou parcialidade) pode ser negociada, através da normativa nº 482 da ANAEEEL, que estabelece as condições gerais para o acesso de microgeração e minigeração distribuída aos sistemas de distribuição de energia elétrica, o sistema de compensação de energia.

As máquinas térmicas modernas convertem apenas parte da energia química produzida pela combustão dos combustíveis em trabalho mecânico. O restante da energia é convertido principalmente em energia térmica. O aproveitamento dessa energia térmica representa grandes benefícios, como menor quantidade de combustível utilizado, menores emissões de gases poluentes, e menor calor rejeitado ao ambiente.

Os gases de escape da microturbina estão em alta temperatura e livre de óleos, desta forma podem se combinar com sistemas de refrigeração por absorção de alta eficiência. Podem também serem utilizados em estufas de horticulturas, onde necessitam de calor, além de outros processos que necessitem utilizar água quente e vapor de água. Em seu estudo, Andreos (2013), obteve com o uso de uma microturbina abastecida a gás natural aproximadamente 171 kWh de energia elétrica, e fazendo-se o aproveitamento energético dos gases de escape, obteve também 136 kWh de água aquecida e 72 kWh de água gelada produzida por um resfriador de líquido por absorção.

A geração e queima do biogás fazem parte do Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL), um instrumento previsto no artigo 12 do Protocolo de Kyoto, com o intuito de ajudar os países em desenvolvimento, a alcançar o desenvolvimento sustentável. Com isso é possível obter os Certificados de Emissões Reduzidas (CERs), ou os chamados "Créditos de Carbono" que podem ser comercializados com os países que excederam a cota de emissões de gases do efeito estufa.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Para o desenvolvimento deste trabalho foram coletados dados e informações em uma propriedade rural, dedicada à criação de vacas holandesas leiteiras, e em catálogos técnicos de fabricantes de microturbinas, compressores, recuperadores de calor e de resfriadores de líquido (chillers de absorção).

3.1 Localização e Caracterização da propriedade

A propriedade rural Vovó Cida, está localizado no município de Buritama, na Região de Araçatuba, a 542 km da cidade de São Paulo. A propriedade rural é destinada á criação de bovinos leiteiros no sistema de confinamento, contando para isso com um rebanho total de 336 animais. Para o confinamento dos animais, a propriedade conta com três barracões, sendo um deles medindo 30 x 63 x 5,5 m (largura, comprimento e altura), onde permanecem 96 animais confinados. Os outros dois barracões são de iguais dimensões, medindo 12 x 45 x 4,5 m (largura, comprimento e largura), sendo distribuídos 120 animais por barracão, conforme ilustrado na Figura 3.1.



FIGURA 3.1 - Barracão de confinamento.
Fonte: Elaborado pelo autor.

O local também possui curral de espera para a realização da ordenha, além de máquinas e equipamentos destinados à realização da ordenha mecânica, e o armazenamento do leite em tanque refrigerado, conforme ilustrados nas Figuras 3.2 e 3.3.



FIGURA 3.2 - Sala de ordenha.
Fonte: Elaborado pelo autor.



FIGURA 3.3 - Tanque resfriado para armazenamento do leite.
Fonte: Elaborado pelo autor.

Os resíduos da criação, como dejetos animais, urinas e água de lavagem dos dois barracões menores (de iguais dimensões) são coletados através de canaletas e grelhas, e transportados até uma caixa de pré-fermentação, onde ocorre a adição de mais água e a diluição do esterco, conforme ilustrado nas Figuras 3.4 a 3.8.



FIGURA 3.4 - Grelhas de coleta de dejetos bovinos.
Fonte: Elaborado pelo autor.



FIGURA 3.5 - Grelhas de coleta de dejetos bovinos.
Fonte: Elaborado pelo autor.



FIGURA 3.6 - Vista da canaleta de condução de dejetos bovinos.
Fonte: Elaborado pelo autor.



FIGURA 3.7 - Caixa de entrada para a diluição do esterco.
Fonte: Elaborado pelo autor.



FIGURA 3.8 - Caixa de entrada do biodigestor, após a diluição dos dejetos.
Fonte: Elaborado pelo autor.

Após a coleta, os resíduos de 240 animais são conduzidos por meio de tubos para um biodigestor do tipo canadense, medindo 12 x 40 x 7 m (largura, comprimento e altura), conforme ilustrado nas Figuras 3.9 e 3.10. O biodigestor é dotado de um canal de alimentação e outro de sucção. O canal de sucção está ligado a uma bomba hidráulica, que recalca o efluente orgânico e distribui ao longo do interior do biodigestor por meio de oito pontos de injeção, no sentido ascendente. Desta forma, proporciona a mistura e a uniformização tanto da massa orgânica, quanto das populações de bactérias anaeróbicas no interior do biodigestor.

Após o processo de biodigestão anaeróbica, o efluente líquido é destinado para uma lagoa aeróbica medindo 8 x 25 x 1,8 m (largura, comprimento e altura), permanecendo por cinco dias antes de ser utilizado para a fertirrigação de culturas de milho e capim napier, que servem de alimentos para os bovinos. A lagoa aeróbica é ilustrada na Figura 3.11.

O biodigestor foi instalado a princípio para a destinação do esterco bovino produzido pela propriedade, pois o mesmo encontrava dificuldades para a disposição final de cerca de 6 toneladas/dia de esterco produzido por 150 vacas. Esta quantidade de resíduos estava provocando poluição no solo e impedindo o desenvolvimento saudável das culturas produzidas.



FIGURA 3.9 - Condução de dejetos pós diluição até o biodigestor
Fonte: Elaborado pelo autor.



FIGURA 3.10 - Biodigestor modelo Canadense.
Fonte: Elaborado pelo autor.



FIGURA 3.11 - Lagoa aeróbica utilizada para a fertirrigação.
Fonte: Elaborado pelo autor.

O biogás produzido na propriedade é destinado para uma motobomba e um motogerador; a motobomba opera por aproximadamente 10 horas diária, e é constituída por um motor de Santana 2000 adaptado para operar com o biogás, no qual está acoplado uma bomba hidráulica que é utilizada para irrigar culturas de milho e capim napier na propriedade com o efluente líquido retirado da lagoa aeróbica. A motobomba é ilustrada nas Figuras 3.12 e 3.13.

O motogerador, ilustrado nas Figuras 3.14 e 3.15, é constituído por um motor diesel adaptado para ser alimentando com biogás, em seu eixo está acoplado um gerador elétrico de 40 kVA, que funciona 12 horas por dia. A energia gerada pelo motogerador é utilizada para alimentar 70% da demanda energética de alguns equipamentos da propriedade como: ventiladores e bombas hidráulicas utilizados para o conforto térmico dos animais nos galpões, equipamento de ordenha e tanque de resfriamento do leite, de bombas hidráulicas utilizadas para misturar e homogeneizar o efluente orgânico presente no biodigestor, e de outros equipamentos elétricos de pequeno porte, que juntos consomem no total aproximadamente 14.300 kWh/mês de energia elétrica.



FIGURA 3.12 - Conjunto motobomba utilizado para a fertirrigação.
Fonte: Elaborado pelo autor.



FIGURA 3.13 - Conjunto motobomba.
Fonte: Elaborado pelo autor.



FIGURA 3.14 - Conjunto motogerador.
Fonte: Elaborado pelo autor.



FIGURA 3.15 - Conjunto motogerador.
Fonte: Elaborado pelo autor.

3.2 Capacidade de produção de resíduos bovinos

Segundo Santos (2010), os resíduos gerados na exploração de criação animal são os mais utilizados nos processos de digestão anaeróbica, por sua elevada biodegradabilidade em condições de anaerobiose. Os resíduos provenientes da mesma atividade pecuária podem apresentar biodegradabilidade e composições diferentes, variando conforme a alimentação recebida, ao porte do animal, ao tipo de criação, à finalidade a que se destina o animal e às condições climáticas do local.

Através de medições e observações fornecidas pelos proprietários e funcionários do sítio, cada vaca de lactação produz em média aproximadamente 40 kg de esterco fresco diariamente. De acordo com pesquisas realizadas em artigos e publicações literárias sobre o assunto, pôde-se confirmar a estimativa média de produção de esterco por um animal bovino de lactação, criado no sistema de confinamento.

3.3 Capacidade de produção de biogás.

A estimativa de produção do biogás pode ser determinada em razão da quantidade e do tipo de matéria orgânica a ser biodegradada, sendo, portanto, obtida através da Equação 3.1.

$$V_{biogás} = Q \cdot P_c \quad (3.1)$$

Em que:

$V_{biogás}$ = Volume de biogás produzido [m³];

Q = Quantidade de matéria orgânica utilizada [kg];

P_c = Potencial de conversão da matéria orgânica em biogás [m³ de biogás/kg de esterco] (vide Tabela 2.5).

3.4 Poder calorífico do biogás

Devido ao tipo e a qualidade da matéria orgânica utilizada no biodigestor, o biogás pode apresentar diversas composições (vide item 2.4.1), influenciando desta maneira no seu poder calorífico. Por apresentar uma composição predominantemente de gás metano e dióxido de carbono, o poder calorífico do biogás pode ser estimado através da quantidade e do poder calorífico do gás metano presente em sua composição, desta maneira o poder calorífico do biogás pode ser obtido através das Equações 3.2 e 3.3.

$$PCI_{biogás} = (\%_{CH_4} \cdot PCI_{CH_4}) \quad (3.2)$$

$$PCS_{biogás} = (\%_{CH_4} \cdot PCS_{CH_4}) \quad (3.3)$$

Em que:

$PCI_{biogás}$ = Poder calorífico Inferior do biogás [kJ/Nm³];

$PCS_{biogás}$ = Poder Calorífico Superior do biogás [kJ/Nm³];

$\%_{CH_4}$ = Quantidade (percentual) de gás metano presente no biogás;

PCI_{CH_4} = Poder Calorífico Inferior do gás metano [kJ/Nm³];

PCS_{CH_4} = Poder Calorífico Superior do gás metano [kJ/Nm³].

O potencial energético do biogás produzido pode ser estimado com base no volume de biogás produzido e em seu poder calorífico, conforme Equações 3.4 e 3.5.

$$E_{PCI} = PCI_{biogás} * V_{biogás} \quad (3.4)$$

$$E_{PCS} = PCS_{biogás} * V_{biogás} \quad (3.5)$$

Em que:

E_{PCI} = Potencial energético fornecido pelo biogás em função do PCI do biogás [kJ];

E_{PCS} = Potencial energético fornecido pelo biogás em função do PCS do biogás [kJ];

$PCI_{biogás}$ = Poder Calorífico Inferior do biogás [kJ/Nm³];

$PCS_{biogás}$ = Poder Calorífico Superior do biogás [kJ/Nm³];

$V_{biogás}$ = Volume de biogás produzido [m³].

3.5 Seleção da microturbina e a produção de energia elétrica.

A quantidade de energia elétrica gerada depende do tipo de equipamento utilizado, da sua capacidade de geração de energia, da qualidade do combustível utilizado, e também das condições ambientais de operação. Para a análise, foi selecionado a microturbina modelo CR30 da CAPSTONE.

As microturbinas operam com elevadas massa de ar durante o processo de combustão, desta forma, sua eficiência e sua potência elétrica gerada, dependem das condições ambientais, tais como temperatura do ar e umidade relativa. A Figura 3.16 ilustra a potência elétrica gerada e a eficiência da microturbina em função da temperatura ambiente.

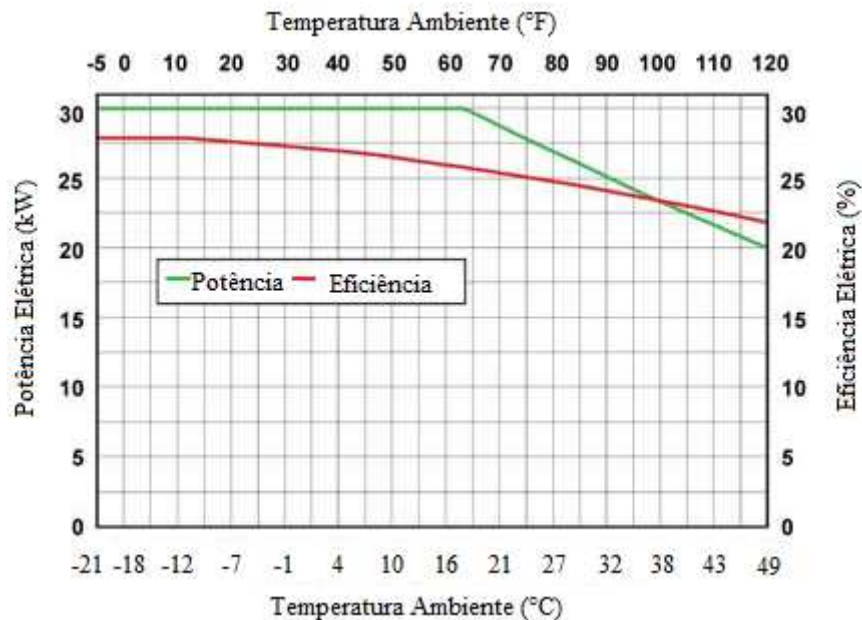


FIGURA 3.16- Diagrama da potência elétrica e eficiência vs. temperatura ambiente.
Fonte: CAPSTONE (2014)

Portanto, a potência elétrica gerada pode ser estimada através da Figura 3.12, permanecendo fixa a temperatura ambiente de operação. Desta forma, a capacidade de

geração de energia elétrica pela microturbina, pode ser determinada em função da energia fornecida pelo biogás produzido, ou seja, pelo fluxo energético requerido pela microturbina, pelo tempo de funcionamento da microturbina e pela potência elétrica gerada neste período, conforme Equação 3.6:

$$E_{Mic} = P_{Mic} \cdot \frac{E_{PCI}}{\phi_{Mic}} \quad (3.6)$$

Em que:

E_{Mic} = Energia elétrica gerada pela microturbina [kWh];

P_{Mic} = Potência elétrica gerada pela microturbina nas condições ambientes de operação [kW];

ϕ_{mic} = Fluxo energético requerido pela microturbina para operar [kJ/h];

E_{PCI} = Potencial energético fornecido pelo biogás em função do PCI do biogás [kJ]

O biogás deve entrar na microturbina com elevada pressão de trabalho, entretanto a pressão de armazenamento do biogás nos biodigestores ou mesmo em "gás bag", são inferiores à pressão requerida pela microturbina (aproximadamente 4,14 a 4,83 bar), portanto se faz necessário o uso de compressores de gases combustíveis, e de cilindros de aço para o armazenamento do biogás; sendo possível sua posterior utilização nas microturbinas. Desta maneira foi selecionado para esta análise, o compressor TRE 200, da fabricante MEHRER. A Tabela 3.1 ilustra os dados técnicos do compressor.

TABELA 3.1 - Dados Técnicos do Compressor Mehrer TRE 200

Compressor TRE 200	
Razão de compressão	1:6
Máxima pressão de sucção	16 bar
Máxima pressão final	16 bar
Vazão volumétrica	14,847 a 26,694 m ³ /h
Potência máxima requerida	5 kW
Faixa de rotação	350 a 700 rpm
Compressão de gases tóxico e inflamáveis	sim
Arrefecimento	A ar

Fonte: MEHRER (2014)

Para determinar a energia elétrica consumida pelo compressor, deve-se estimar o tempo gasto pelo compressor para elevar a pressão do biogás produzido para seu

armazenamento. O tempo gasto pelo compressor pode ser obtido através da razão entre o volume de biogás produzido e a vazão com que ele sofre a compressão, conforme a Equação 3.7:

$$t_{Comp} = \frac{V_{biogás}}{\phi_{Comp}} \quad (3.7)$$

Em que:

t_{Comp} = Tempo de operação do compressor [h];

$V_{biogás}$ = Volume de biogás produzido [m³];

$\phi_{Comp.}$ = Vazão volumétrica de compressão [m³/h].

A energia elétrica consumida pelo compressor pode ser estimada pelo produto entre o tempo de operação e a potência elétrica requerida para seu funcionamento, conforme a Equação 3.8.

$$E_{Comp} = P_{Comp} \cdot t_{Comp} \quad (3.8)$$

Em que:

E_{Comp} = Energia elétrica consumida pelo compressor [kWh];

P_{Comp} = Potência elétrica consumida pelo compressor [kW];

t_{Comp} = Tempo de operação do compressor [h].

3.6 Formas de aproveitamento energético – Aquecimento de água

Para melhorar a eficiência energética do processo, pode-se fazer o uso do calor residual proveniente dos gases gerados através da combustão do biogás na microturbina, estes gases de exaustão deixam a microturbina à elevada temperatura (aproximadamente 275 °C) e são lançados diretamente na atmosfera. Para o reaproveitamento energético desses gases, pode-se fazer o uso do recuperador de calor ITC 1 da CAPSTONE, que pode ser ligado

diretamente na tubulação de exaustão da microturbina analisada; os dados técnicos do recuperador de calor ITC 1, são ilustrado na Tabela 3.2.

TABELA 3.2 - Dados Técnicos do Recuperador de Calor ITC 1

Recuperador de Calor ITC 1	
Potência da bomba de água	2 HP (15 kW)
Tensão de alimentação	3 x 380 - 50Hz / 3 x 220 - 60Hz
Temperatura de entrada dos gases de escape	275 °C
Temperatura máxima de saída de água	95 °C
Vazão máxima de água	120 L/min

Fonte: CAPSTONE (2014)

Como o recuperador de calor ficará instalado logo na saída dos gases de escape da microturbina, pode-se considerar que não haverá variação de temperatura dos gases que deixam a microturbina e que entram no recuperador de calor, portanto, a água que deixará o recuperador de calor sairá no máximo a 95 °C, conforme dados do fabricante. A quantidade de água aquecida que será possível produzir pode ser estimada através da razão da energia térmica proveniente dos gases de escape da microturbina, pela quantidade de energia necessária para aquecer a água até 95 °C, conforme a Equação 3.9.

$$Q_h = \frac{\dot{m}_{gás} \cdot c_{p_{gás}} \cdot (T_{er} - T_{sr})}{c_{p_{H_2O}} \cdot \rho_{H_2O} \cdot (T_h - T_a)} \cdot (3600 \cdot t_{rec}) \quad (3.9)$$

Em que:

Q_h = Volume produzido de água aquecida a 95 °C [m³];

$\dot{m}_{gás}$ = Vazão mássica dos gases de exaustão da microturbina [kg/s];

$c_{p_{gás}}$ = Calor específico dos gases de exaustão [kJ/kg·K];

T_{er} = Temperatura dos gases de exaustão na entrada do recuperador de calor [K];

T_{sr} = Temperatura dos gases de exaustão na saída do recuperador de calor [K];

$c_{p_{H_2O}}$ = Calor específico da água [kJ/kg·K];

T_h = Temperatura da água na saída do recuperador de calor [K];

T_a = Temperatura da água na entrada do recuperador de calor [K];

ρ_{H_2O} = Massa específica da água [kg/m³];

t_{Rec} = Tempo de operação do recuperador de calor [h];

Para efeitos de cálculos, foram consideradas as seguintes propriedades:

- ✓ Água: $\rho_{H_2O} = 1.000 \text{ kg/m}^3$, $Cp_{H_2O} = 4,22 \text{ kJ/kg} \cdot K$, $T_a = 298 \text{ K (25}^\circ\text{C)}$ e $T_h = 368 \text{ K (95}^\circ\text{C)}$.
- ✓ Gases de exaustão: $\dot{m}_{gás} = 0.31 \text{ kg/s}$, $Cp_{gás} = 1,00 \text{ kJ/kg} \cdot K$, $T_{er} = 584 \text{ K (275}^\circ\text{C)}$, $T_{sr} = 398 \text{ K (125}^\circ\text{C)}$.

Como as microturbinas operam com elevadas massas de ar durante o processo de combustão, foi considerado para efeitos de cálculos que os gases de exaustão são compostos predominantemente de ar aquecido, desta forma, o calor específico dos gases de exaustão da microturbina pode ser considerado como sendo o calor específico do ar.

A energia elétrica consumida pela bomba do recuperador de calor pode ser obtida através do produto da potência elétrica consumida e do tempo de operação do recuperador de calor, conforme a Equação 3.10.

$$E_{Rec} = P_{Rec} \cdot t_{Rec} \quad (3.10)$$

Em que:

E_{Rec} = Energia elétrica consumida pela bomba do recuperador de calor [kWh];

P_{Rec} = Potência elétrica consumida pela bomba do recuperador de calor [kW];

t_{Rec} = Tempo de operação do recuperador de calor [h].

3.7 Formas de aproveitamento energético – Efeito de refrigeração

Para o aproveitamento energético dos gases de escape visando à produção de frio, pode-se utilizar de um resfriador de líquido (chiller de absorção) que tem como fonte quente, a água aquecida produzida pelo recuperador de calor instalado na saída da microturbina. Para isso, pode-se utilizar um sistema de recirculação de água entre o recuperador de calor e o resfriador de líquido. O tempo gasto para realizar o aquecimento da água até as condições de funcionamento do resfriador de líquido pode ser obtido através da Equação 3.11.

$$t_{aq} = \frac{V_h \cdot \rho_{H_2O} \cdot C_{p_{H_2O}} \cdot (T_h - T_a)}{\dot{m}_{gás} \cdot C_{p_{gás}} \cdot (T_{er} - T_{sr})} \quad (3.11)$$

Em que:

t_{aq} = Tempo consumido para aquecer a água da temperatura ambiente até 95°C [h];

V_h = Volume de água aquecida disponível no recuperador de calor [m³];

ρ_{H_2O} = Massa específica da água [kg/m³];

$C_{p_{H_2O}}$ = Calor específico da água [kJ/kg · K];

T_h = Temperatura da água que sai do recuperador de calor [K];

T_a = Temperatura da água que entra no recuperador de calor [K];

$\dot{m}_{gás}$ = Vazão mássica dos gases de exaustão da microturbina [kg/s];

$C_{p_{gás}}$ = Calor específico dos gases de exaustão [kJ/kg · K];

T_{er} = Temperatura dos gases de exaustão na entrada do recuperador de calor [K];

T_{sr} = Temperatura dos gases de exaustão na saída do recuperador de calor [K];

Para efeitos de cálculo foi considerado que o volume de água (V_h) disponível para recirculação entre o recuperador de calor e o resfriador de líquido é de 0,15 m³. A energia elétrica consumida pela bomba do recuperador de calor, até as condições de operação do resfriador de líquido, pode ser calculada através da Equação 3.10.

O resfriador de líquido (chiller) selecionado foi o da LS GROUP, modelo LWM-W003, que opera com água quente a baixas temperaturas; utilizando-se do Brometo de lítio (LiBr) como absorvente e a água como refrigerante. Os dados técnicos do chiller são apresentados na Tabela 3.3.

TABELA 3.3 - Dados Técnicos do Chiller LWM-W003

Chiller LWM-W003		
Capacidade de refrigeração	28 TR	98,56 kW
Água do Chiller (Fluído de refrigeração)	Temperatura de entrada	12 °C
	Temperatura de saída	7 °C
	Vazão Volumétrica	17,1 m³/h
Água de resfriamento	Temperatura de entrada	31 °C
	Temperatura de saída	36,5 °C
	Vazão volumétrica	37,4 m³/h
Água de aquecimento (Fornecimento de calor)	Temperatura de entrada	95 °C
	Temperatura de saída	80 °C
	Vazão volumétrica	8,0 m³/h
Equipamentos elétricos (bombas hidráulicas, painel de controle etc)	Potência elétrica	4,4 kVA (1,4 kW)
Bombas hidráulicas	Potência elétrica	0,6 kW
Dimensões	Largura	2.020 mm
	Comprimento	1.344 mm
	Altura	1.952 mm
	Peso	2.100 kg

Fonte: LS GROUP (2014)

A capacidade de refrigeração do resfriador de líquido (chiller) pode ser calculado através do coeficiente de rendimento ou performance (COP) do equipamento operando em plena carga. O COP pode ser obtido através da razão entre o efeito que se deseja obter e a energia necessária para isso, conforme Equação 3.12.

$$COP_{abs} = \frac{Q_F}{Q_G + w_{bomba}} \quad (3.12)$$

Em que:

COP_{abs} = Coeficiente de performance (rendimento) do resfriador de líquido (chiller);

Q_F = Capacidade de refrigeração do resfriador de líquido (chiller) [kW];

Q_G = Calor injetado no resfriador de líquido (chiller) [kW];

w_{bomba} = Potência elétrica consumida pela bomba do resfriador de líquido (chiller) [kW].

A vazão mássica de água aquecida obtida pela recirculação de água entre o recuperador de calor e o resfriador de líquido pode ser definida através da Equação 3.13.

$$\dot{m}_{H_2O} = \frac{\dot{m}_{gás} \cdot c_{p_{gás}} \cdot (T_{sr} - T_{er})}{c_{p_{H_2O}} \cdot (T_e - T_s)} \quad (3.13)$$

Em que:

\dot{m}_{H_2O} = vazão mássica de água de recirculação [kg/s];

$\dot{m}_{gás}$ = Vazão mássica dos gases de exaustão da microturbina [kg/s];

$c_{p_{gás}}$ = Calor específico dos gases de exaustão [kJ/kg·K];

T_{er} = Temperatura dos gases de exaustão na entrada do recuperador de calor [K];

T_{sr} = Temperatura dos gases de exaustão na saída do recuperador de calor [K];

$c_{p_{H_2O}}$ = Calor específico da água [kJ/kg·K];

T_e = Temperatura da água que entra no resfriador de líquido (chiller) [K];

T_s = Temperatura da água que sai do resfriador de líquido (chiller) [K];

O calor injetado no resfriador de líquido pode ser obtido através da energia térmica transferida pela água aquecida (recirculação) proveniente do recuperador de calor, conforme a Equação 3.14;

$$\dot{Q}_G = \dot{m}_{H_2O} \cdot c_{p_{H_2O}} \cdot (T_e - T_s) \quad (3.14)$$

Em que:

\dot{Q}_G = Taxa de calor que entra no resfriador de líquido (chiller) [kW];

\dot{m}_{H_2O} = vazão mássica de água de recirculação [kg/s]

$c_{p_{H_2O}}$ = Calor específico da água [kJ/kg·K];

T_e = Temperatura da água que entra no resfriador de líquido (chiller) [K];

T_s = Temperatura da água que sai do resfriador de líquido (chiller) [K]

Para efeitos de cálculos, foram considerados os seguintes valores:

$$T_e = 368 \text{ K (95}^\circ\text{C)} \text{ e } T_s = 353 \text{ K (80 }^\circ\text{C)}.$$

Pode-se então, determinar a capacidade de refrigeração do resfriador de líquido (chiller) para cargas parciais de energia térmica aplicada no resfriador de líquido (gerador), com base no COP de plena carga, na quantidade de energia térmica disponível e no tempo de operação, conforme a Equação 3.15

$$Q_F = COP_{abs} \cdot (Q_G + w_b) \cdot t_{chi} \quad (3.15)$$

Em que:

Q_F = Capacidade de refrigeração do resfriador de líquido (chiller) [kWh];

COP_{abs} = Coeficiente de performance (rendimento) do resfriador de líquido (chiller);

Q_G = Calor injetado no resfriador de líquido (chiller) [kW];

w_b = Potência elétrica consumida pela bomba do resfriador de líquido (chiller) [kW].

t_{chi} = Tempo de operação do resfriador de líquido (chiller) [h].

A energia utilizada pela bomba do resfriador de líquido (chiller) pode ser obtida através da potência elétrica e o tempo de funcionamento do equipamento, conforme Equação 3.16.

$$E_{chi} = P_{chi} \cdot t_{chi} \quad (3.16)$$

Em que:

E_{chi} = Energia consumida pela bomba do resfriador de líquido (chiller) [kWh];

P_{chi} = Potência elétrica da bomba do resfriador de líquido (chiller) [kW];

t_{chi} = Tempo de operação do resfriador de líquido (chiller) [h].

3.8 Análise inicial de custo

O custo do kilowatt instalado pode ser calculado através dos custos de equipamentos utilizados para a geração de energia elétrica e dos equipamentos utilizados para o aproveitamento térmico dos gases de escape. A Tabela 3.4 apresenta os custos aproximados dos equipamentos utilizados.

TABELA 3.4 - Custo aproximado dos equipamentos utilizados para geração de energia e aproveitamento térmico.

Equipamento	Custo aproximado (R\$)
Microturbina Capstone + Compressor de biogás TRE200	380.000,00
Trocador de calor Capstone	36.000,00
Resfriador de líquido LWM-W003	40.000,00

O custo do kilowatt bruto instalado pode ser determinado através da Equação 3.17.

$$C_{\text{Bruto}} = \frac{C_e}{P_{\text{el inst}}} \quad (3.17)$$

Em que:

C_{Bruto} = Custo bruto da energia elétrica produzida [R\$/kW];

C_e = Custo do equipamento [R\$];

$P_{\text{el inst}}$ = Potência elétrica instalada [kW]

O custo da energia elétrica líquida produzida pode ser obtida adicionando-se os ganhos de energia térmica e descontando-se as parcelas dos gastos de energia elétrica dos equipamentos para cada processo, conforme ilustrado nas Equações 3.18.

$$C_{\text{Líquido}} = \frac{C_e}{P_{\text{el inst}} - P_{\text{el Térmica}} + P_{\text{el gasto}}} \quad (3.18)$$

Em que:

$C_{\text{Líquido}}$ = Custo líquido da energia elétrica produzida [R\$/kW];

$P_{\text{el Térmica}}$ = Potência elétrica de origem térmica [kW];

$P_{\text{el gasto}}$ = Potência elétrica consumida pelos equipamentos [kW].

4. RESULTADOS E ANÁLISE

Considerando a propriedade rural analisada, são recolhidos para o biodigestor, dejetos orgânicos provenientes de 240 bovinos leiteiros diariamente. Considerando a produtividade média de 40 kg/animal de esterco fresco diariamente, e com auxílio da Equação 3.1 e dos dados da Tabela 3.1, pode-se estimar o potencial produtivo de biogás. Cada animal bovino é capaz de produzir através da biodigestão de seus dejetos, entre 1,6 a 1,96 m³ de biogás por dia, ou seja, com os dejetos recolhidos dos 240 animais é possível obter aproximadamente de 384 a 470,4 m³ de biogás por dia, conforme ilustrado nas Figuras 4.1 e 4.2.

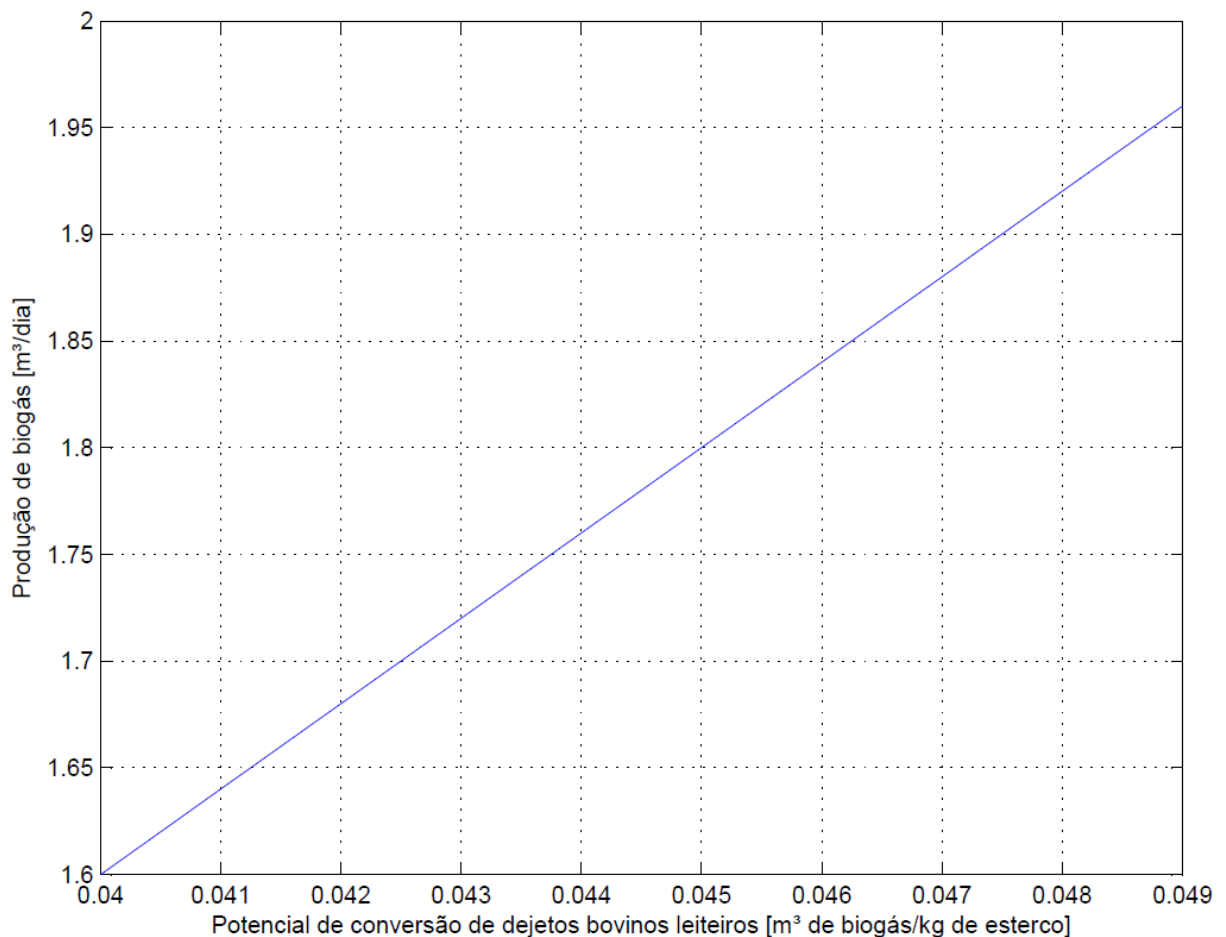


FIGURA 4.1- Produtividade média de biogás para 40 kg de dejetos (um animal).

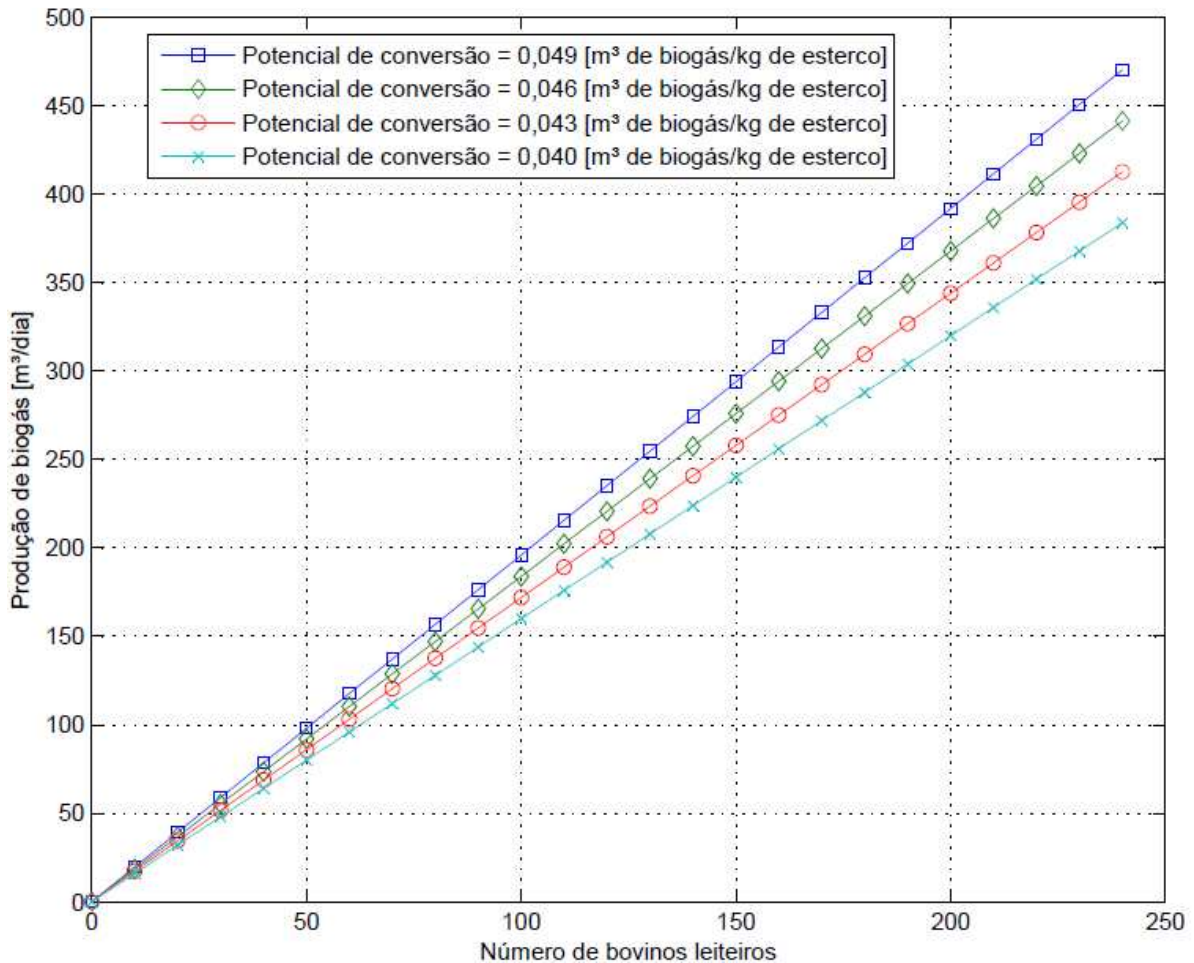


FIGURA 4.2- Produção de biogás em função do número de bovinos leiteiros.

O poder calorífico do biogás foi determinado com auxílio das Equações 3.2 e 3.3. O percentual de gás metano presente no biogás bovino pode ser obtido através de dados da literatura e do biogás usualmente encontrados em biodigestores rurais; e de acordo com Costa (2013), o poder calorífico inferior (PCI) do gás metano é de aproximadamente 8.570 kcal/Nm³ (35.857 kJ/Nm³), e o seu poder calorífico superior (PCS) é de 9.530 kcal/Nm³ (39.874 kJ/Nm³). Portanto, para um biogás de composição típica, com 50 % de gás metano presente em sua composição, seu PCI é de 17.929 kJ/Nm³ e seu PCS é de 19.937 kJ/Nm³.

Tal como se apresenta na literatura, adotou-se no presente trabalho o PCI do biogás para a estimativa do potencial energético. O potencial energético pode ser obtido através da biodigestão dos dejetos provenientes de um bovino leiteiro diariamente, utilizando-se da Equação 3.4. A Figura 4.3, ilustra o potencial energético de um bovino leiteiro.

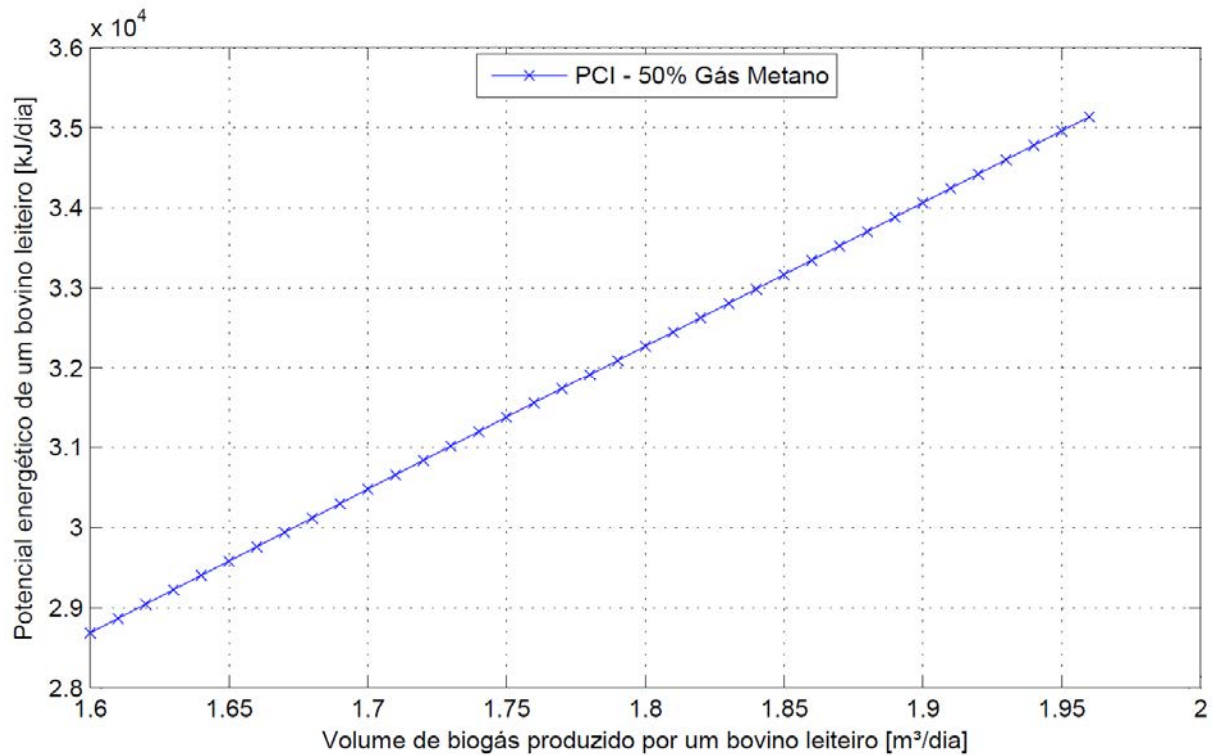


FIGURA 4.3- Potencial energético que pode ser obtido através da biodigestão de dejetos orgânicos de um bovino leiteiro.

A produção energética da microturbina varia em função do PCI do biogás e das condições ambientais de operação, de acordo com o CENTRO INTEGRADO DE INFORMAÇÕES AGROMETEOROLÓGICAS (CIIAGRO, 2014), a média de temperatura máxima no município de Buritama é de aproximadamente 30°C (86°F); e com auxílio da Equação 3.6, pode-se determinar a produtividade diária de energia elétrica da microturbina. Desta forma, para um biogás típico com 50 % de gás metano e produtividade de 384 m³/dia pode-se obter aproximadamente 391,7 kWh/dia de energia elétrica; caso a produtividade de biogás for de 470,4 m³/dia, pode-se obter aproximadamente 479,8 kWh/dia de energia elétrica. A Figura 4.4 ilustra a produção energética da microturbina e o consumo energético do compressor em função do número de animais encontrado na propriedade, variando a produção diária de biogás.

A produção líquida de energia que a microturbina fornecerá à propriedade pode ser obtida subtraindo-se o consumo energético do compressor, da energia produzida pela microturbina. Desta forma, para produtividade de 384 m³/dia pode ser gerado aproximadamente 319,8 kWh/dia de energia elétrica, e para o caso em que a produtividade do biogás for de 470,4 m³/dia, pode ser gerado aproximadamente 391,7 kWh/dia de energia elétrica. A Figura 4.5, ilustra a produtividade líquida de energia elétrica da microturbina em

função do número de animais encontrado na propriedade, conforme a produção diária de biogás.

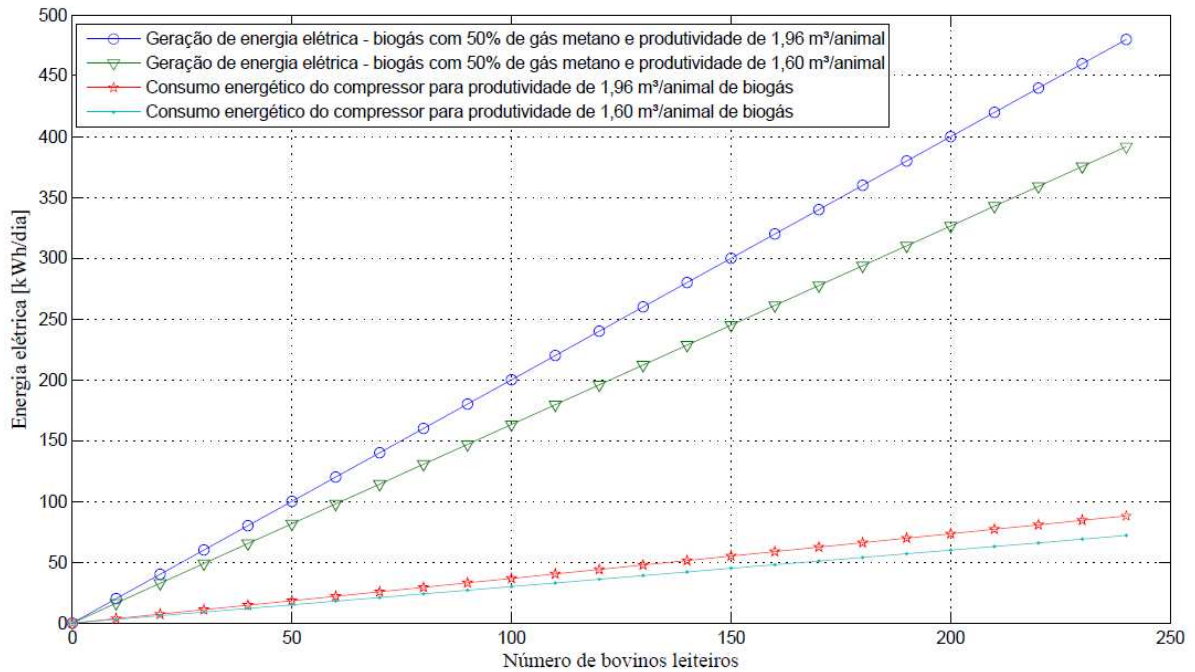


FIGURA 4.4 - Produção energética da microturbina, e consumo energético do compressor em função do número de bovinos leiteiros.

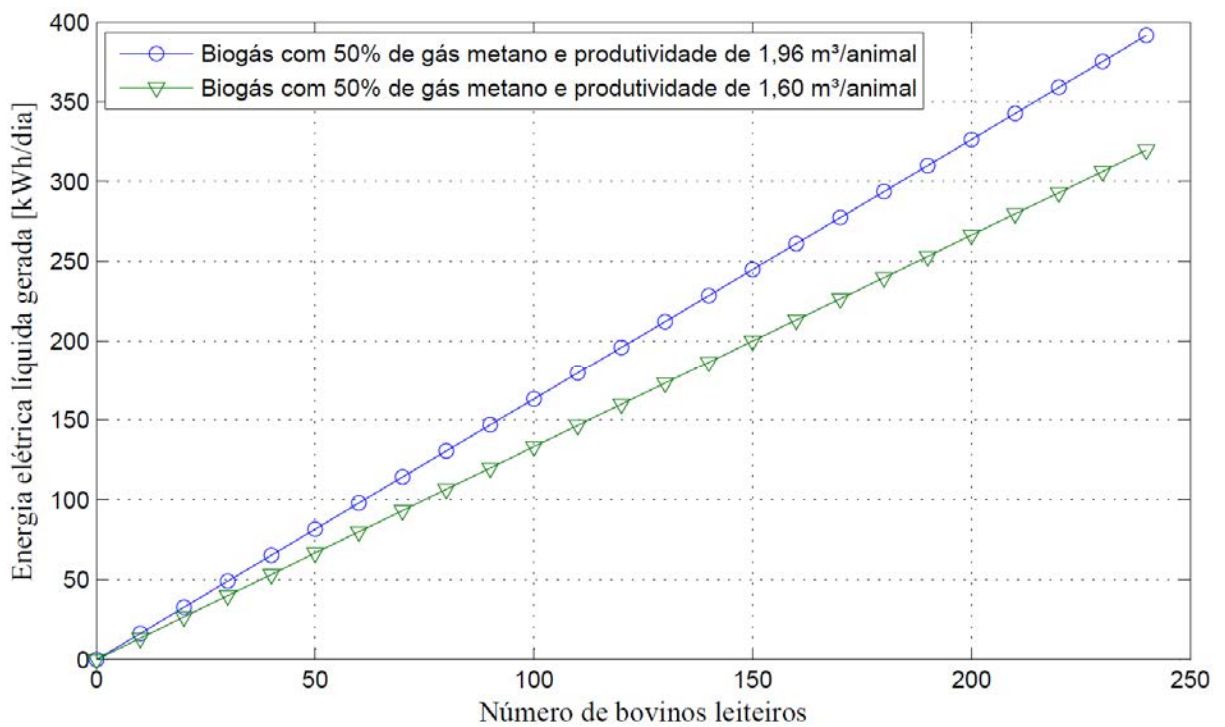


FIGURA 4.5 - Geração líquida de energia da microturbina.

A água aquecida a 95 °C poderá ser destinada para a esterilização e a limpeza dos equipamentos utilizados durante a ordenha do leite, do tanque de armazenamento de leite e também do ambiente onde se realiza a ordenha. Com auxílio da Equação 3.9 pode ser obtida a quantidade de água aquecida a 95 °C, proveniente do aproveitamento da energia térmica dos gases de escape da microturbina, através de um recuperador de calor. Considerando que recuperador de calor irá operar durante todo o período de funcionamento da microturbina, temos que para produtividade de 384 m³/dia pode-se obter aproximadamente 8,5 m³/dia de água aquecida; caso a produtividade de biogás for de 470,4 m³/dia, pode-se obter aproximadamente 10,5 m³/dia de água aquecida a 95 °C. A Figura 4.6, ilustra a quantidade de água aquecida a 95 °C produzida pelo recuperador de calor em função do número de animais encontrado na propriedade, variando a produção do biogás.

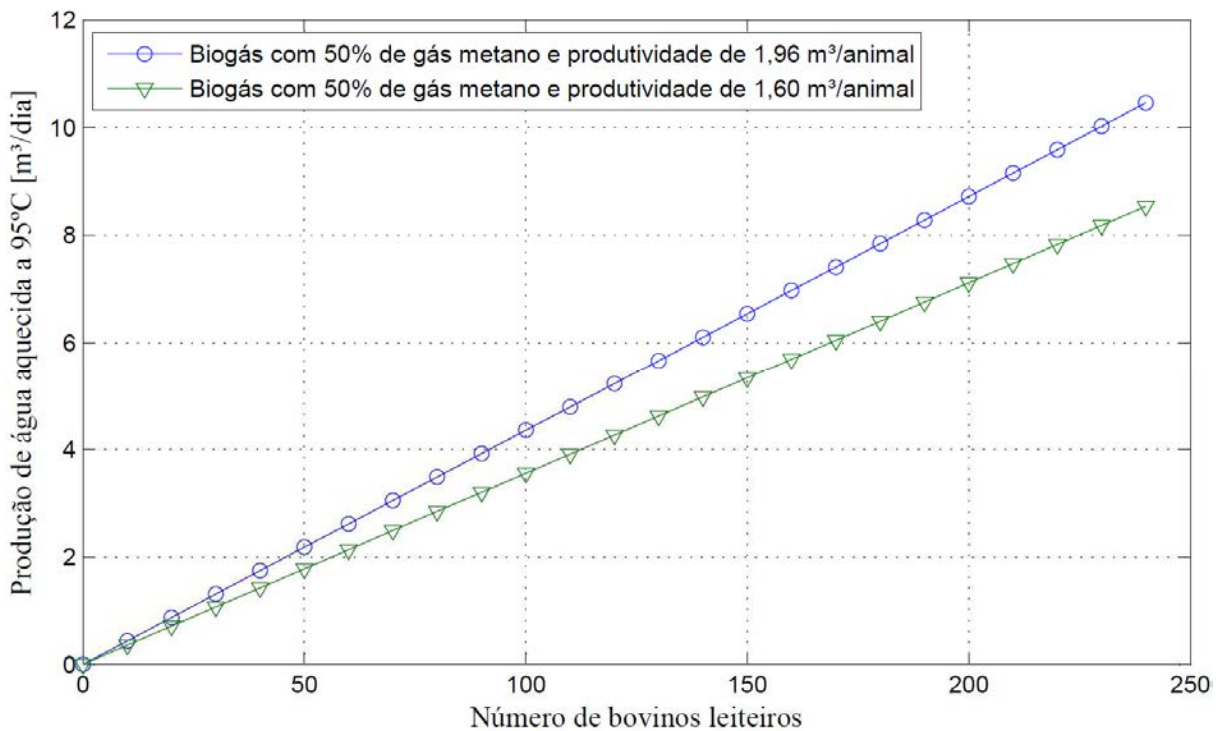


FIGURA 4.6 - Quantidade de água aquecida (95 °C) produzida pelo recuperador de calor.

O recuperador de calor opera com auxílio de uma bomba hidráulica para promover a circulação da água em seu interior, para isto, a bomba consome 1,5 kW de potência elétrica, conforme dados do fabricante (vide Tabela 3.4). Neste cenário, para produtividade de biogás de 384 m³/dia pode-se obter 297,2 kWh/dia de energia elétrica; caso a produtividade for de 470,4 m³/dia, pode-se obter 364,0 kWh/dia de energia elétrica. A Figura 4.7, ilustra a produtividade líquida de energia elétrica (energia elétrica gerada pela microturbina, descontando-se o consumo energético do compressor e da bomba do recuperador de calor)

fornecida em função do número de animais encontrado na propriedade, conforme a produção e o PCI do biogás.

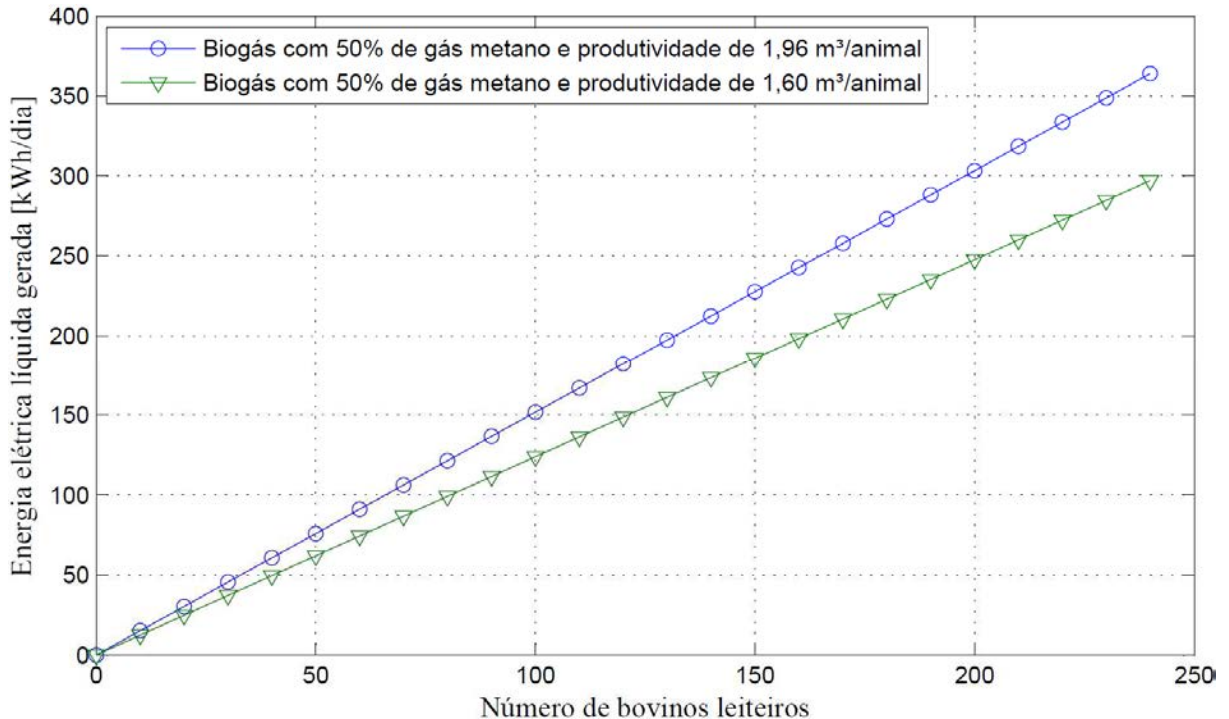


FIGURA 4.7 - Geração líquida de energia da microturbina com aquecimento de água.

Para fins de aproveitamento energético visando à produção de frio, que poderá ser destinado à redução da temperatura do leite produzido na propriedade, ou mesmo para o conforto térmico de seres humanos ou de animais, pode-se utilizar o calor proveniente da água aquecida oriundo do recuperador de calor, como sendo a fonte quente de um resfriador de líquido (chiller). Pelo uso das Equações 3.11, 3.12, 3.13 e 3.14 pode-se obter o tempo de aquecimento da água de recirculação (entre o recuperador de calor e o resfriador de líquido), COP teórico do resfriador de água, a vazão mássica da água de recirculação e a quantidade de energia térmica destinada ao resfriador de líquido; e através da Equação 3.15 pode-se determinar a carga de refrigeração fornecida pelo resfriador de líquido. Para um cenário em que a produtividade do biogás for de 384 m³ pode-se obter aproximadamente 495,0 kWh/dia de capacidade de refrigeração; caso a produtividade do biogás for de 470,4 m³/dia, pode-se obter 606,4 kWh/dia de capacidade de refrigeração.

A Figura 4.8, ilustra a capacidade de refrigeração que pode ser obtida pelo resfriador de líquido (chiller) em função do número de animais encontrado na propriedade, variando a produção diária de biogás.

Para sua operação o resfriador de líquido (chiller) exige 1,4 kW de potência elétrica no acionamento de seus componentes, portanto a energia elétrica consumida em determinado tempo de operação pode ser calculada pela Equação 3.16. Considerando que o resfriador de líquido começará a operar após o aquecimento do volume de água de recirculação, e só irá parar de operar quando cessar a atividade da microturbina e do recuperador de calor, pode-se calcular a energia líquida que será fornecida pela microturbina, ou seja, a energia produzida pela microturbina descontando-se os valores referentes ao consumo do compressor de biogás, da bomba do recuperador de calor, da bomba do resfriador de líquido e de demais componentes elétricos. Para com produtividade igual a 384 m³/dia, o fornecimento líquido de energia elétrica é de 197,7 kWh/dia; caso a produtividade for de 470,4 m³/dia, pode-se obter 242,2 kWh/dia de energia elétrica. A Figura 4.9, ilustra a produtividade líquida de energia elétrica da microturbina em função do número de animais encontrado na propriedade, variando a produção do biogás.

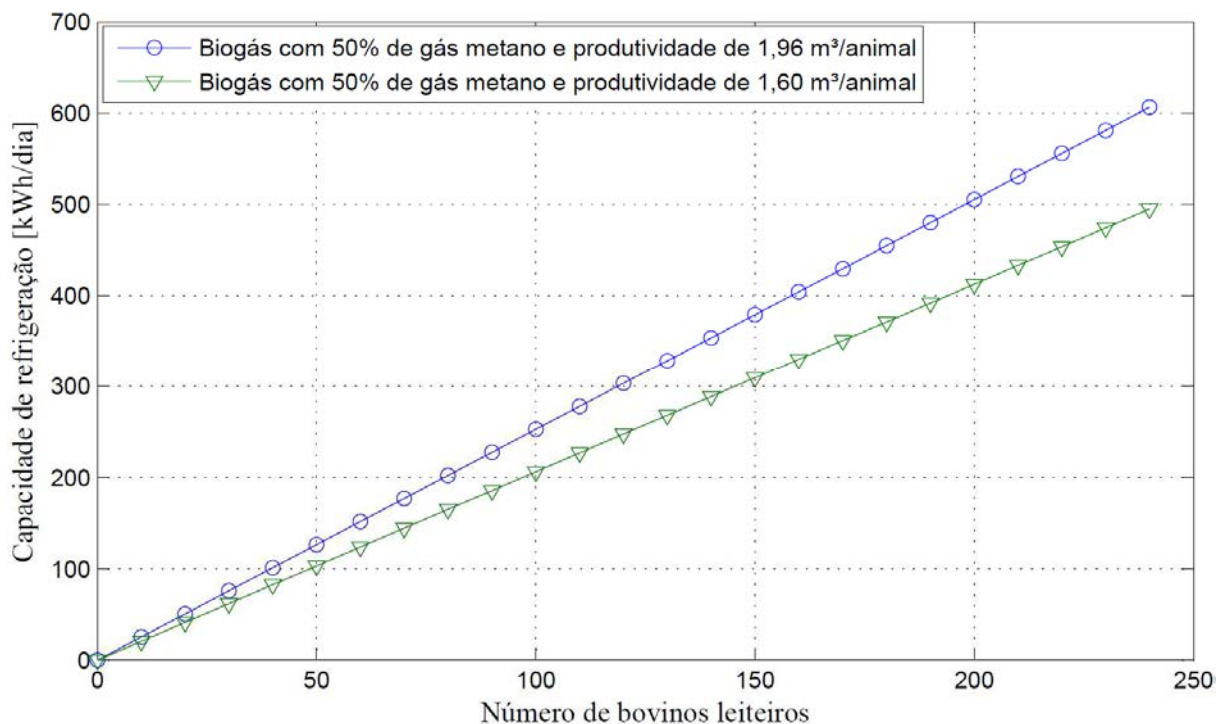


FIGURA 4.8 - Capacidade de refrigeração fornecida pelo resfriador de líquido (chiller).

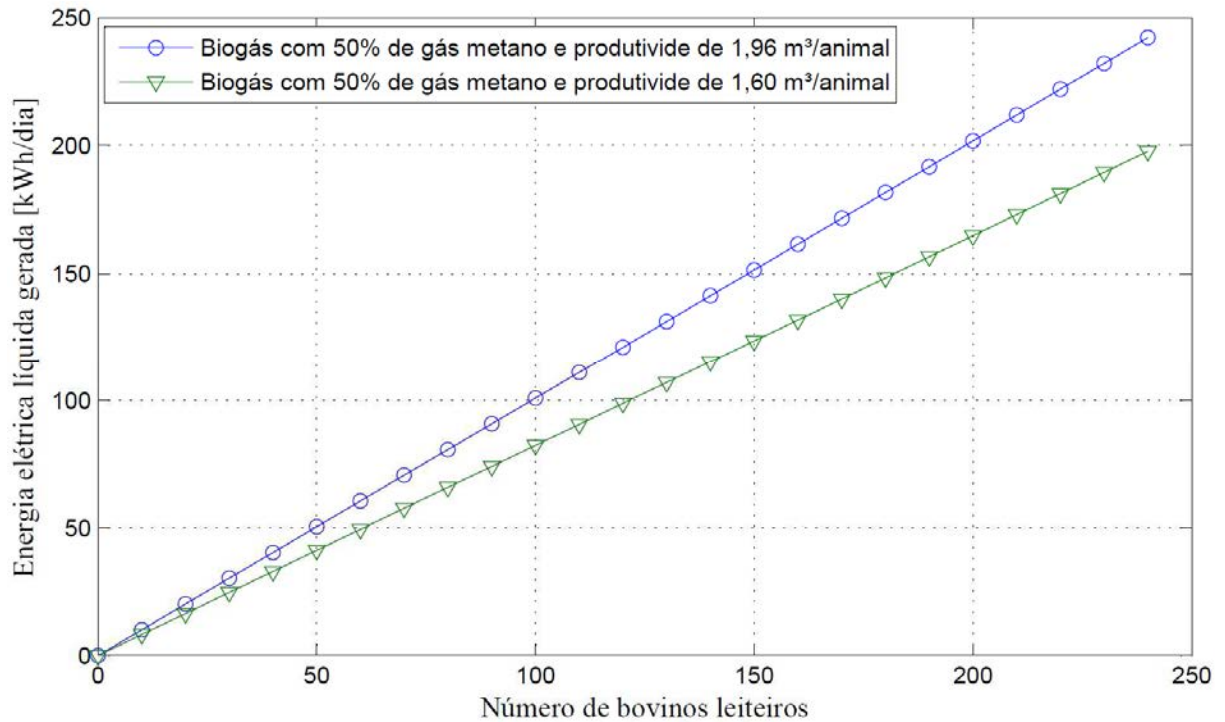


FIGURA 4.9 - Geração líquida de energia elétrica da microturbina com refrigeração (chiller).

A Figura 4.10 ilustra a quantidade de energia elétrica gerada através da microturbina e também a quantidade de energia elétrica consumida pelos equipamentos utilizados para a compressão do biogás, para o aquecimento de água e para o resfriamento de líquido, tomando por base o volume mínimo de biogás que pode ser produzido por um bovino leiteiro.

A Figura 4.11, ilustra a quantidade de energia elétrica líquida que pode ser fornecida através da geração direta (geração de energia elétrica pela microturbina, subtraindo-se o consumo energético do compressor de gás), por meio do aproveitamento energético com o aquecimento de água (geração de energia elétrica da microturbina, retirando-se as parcelas de energia referente ao compressor de gás e a bomba do recuperador de calor) e por meio do resfriamento de líquido (geração de energia elétrica na microturbina, subtraindo-se o consumo do compressor de gás, da bomba do recuperador de calor e da bomba do resfriador de líquido).

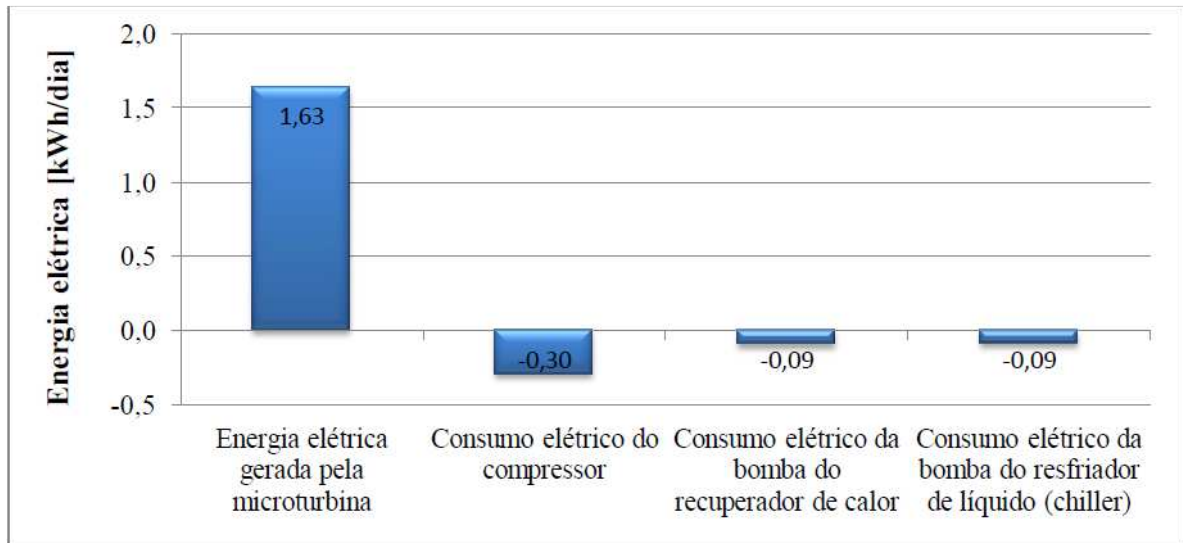


FIGURA 4.10 – Energia elétrica gerada pela microturbina e o consumo elétrico dos equipamentos utilizados para os casos de: geração direta, com o uso de aquecimento de água e com o uso do resfriamento de líquido, obtido por um animal (para os dados apresentados na tabela 4.1).

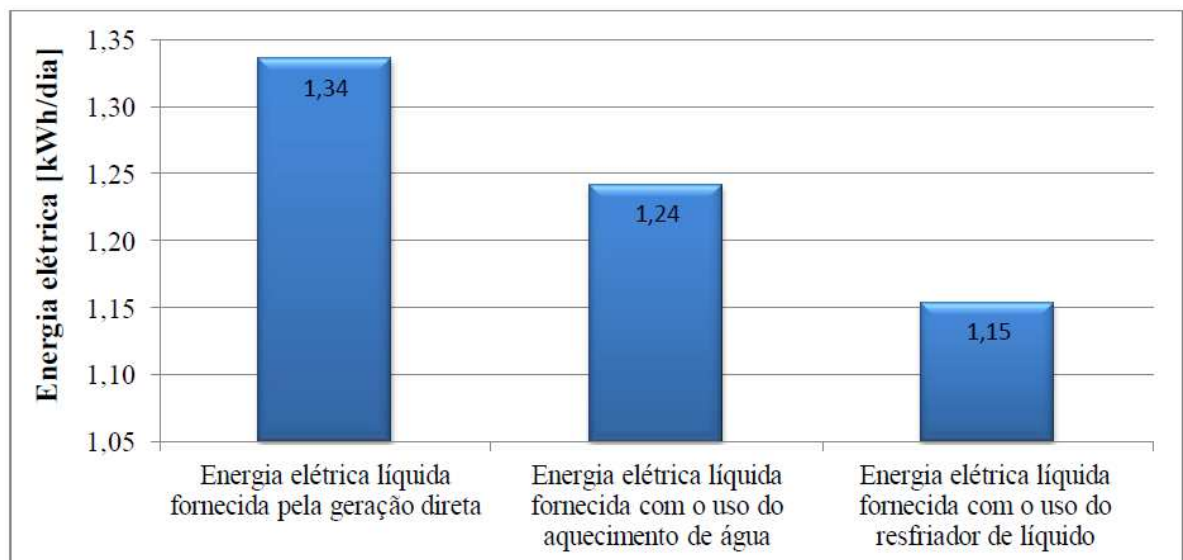


FIGURA 4.11 – Fornecimento líquido de energia elétrica para os casos de: geração direta, com o uso do aquecimento de água e com o uso do resfriamento de líquido, obtido por um animal (para os dados apresentados na tabela 4.1).

A Figura 4.12 ilustra o potencial energético do biogás produzido, e as quantidades de energia envolvidas durante o processo de geração de energia elétrica e produção de água aquecida, com base no volume mínimo de biogás que pode ser produzido por um bovino leiteiro. Para este cenário, a eficiência energética global do processo é de aproximadamente 57,1 %.

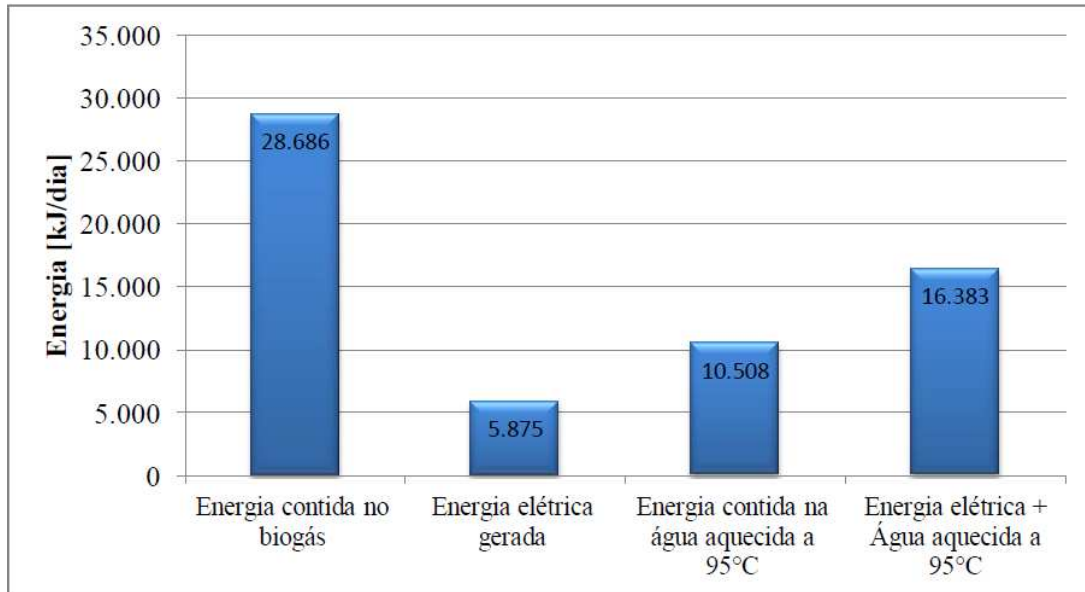


FIGURA 4.12 – Quantidade de energia contida no biogás, na energia elétrica gerada e no volume de água aquecida produzida, obtido para um animal.

O potencial energético do biogás produzido, a quantidade de energia envolvida no processo de geração de energia elétrica e a quantidade de refrigeração que poderá ser obtido através do resfriador de líquido são ilustrados na Figura 4.13. Neste cenário, a eficiência energética global do processo é de aproximadamente 46,4 %.

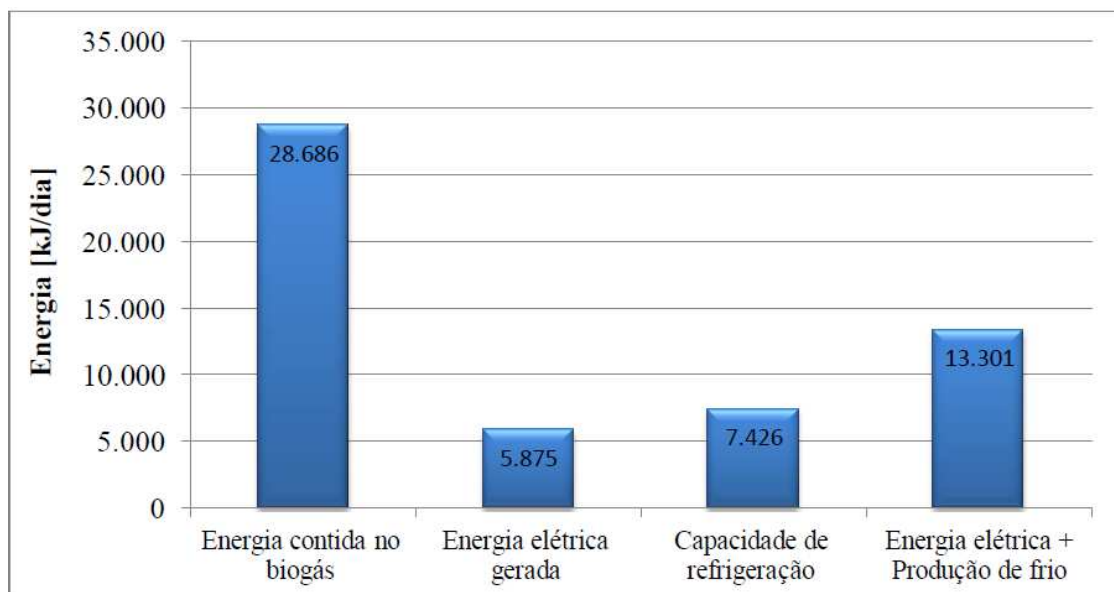


FIGURA 4.13 – Quantidade de energia contida no biogás, na energia elétrica gerada e na capacidade de refrigeração produzido pelo resfriador de líquido, obtido para um animal.

Com auxílio da Equação 3.17 pode-se obter o custo bruto da energia gerada, sendo assim, para o caso da geração direta de energia o custo bruto da energia elétrica instalada é de R\$ 12.666,67/kW, para o caso de geração de energia elétrica com aproveitamento térmico dos gases de escape para a produção de água aquecida, o custo bruto da energia é de R\$ 13.866,67/kW. Para o caso em que o objetivo é a produção de frio, o preço bruto da energia instalada é de R\$ 15.200,00/kW. Considerando a região analisada, pode-se verificar que a potência elétrica da microturbina diminui, desta forma, com auxílio da Equação 3.18, pode-se obter o custo líquido da energia gerada. Assim para a geração direta de energia elétrica o custo líquido é de R\$ 14.615,84/kW, para o caso em que será feito o aproveitamento térmico dos gases de escape para a produção de água aquecida, o custo líquido da energia é de R\$ 5.859,15/kW, e para o caso em que haverá a produção de frio o custo líquido da energia é de R\$ 8.148,68/kW.

5. CONCLUSÃO

Este trabalho visou no estudo do aproveitamento energético do biogás proveniente da decomposição de dejetos bovinos leiteiros em microturbinas, tanto para fins de geração de energia elétrica, como também para o aproveitamento energético dos gases de escape da microturbina para fins de aquecimento de água e resfriamento de líquido. Na propriedade analisada são coletados e destinados ao biodigestor aproximadamente 9,6 toneladas de esterco fresco diariamente, provenientes de 240 animais. Com esta quantidade de dejetos é possível produzir aproximadamente de 384 a 470,4 m³ de biogás diariamente, que podem ser utilizados em uma microturbina a gás para a geração de energia elétrica, sendo possível gerar entre 5.931 a 11.751 kWh/mês de energia elétrica líquida, que corresponde de 41,5 a 82,2 % da demanda energética propriedade. Além disso, realizando-se o aproveitamento térmico dos gases de escape é possível produzir ao menos 8,5 m³/dia de água aquecida a 95 °C, que poderá ser destinado à limpeza e esterilização do ambiente de ordenha e de equipamentos utilizados na produção leiteira. Ou pode-se destinar a água aquecida a 95 °C para o acionamento de um resfriador de líquido, obtendo pelo menos 14.850 kWh/mês de capacidade de refrigeração, que pode ser utilizada para o resfriamento de ambientes ou mesmo para a diminuição de parte da temperatura do leite ordenhado antes de ser armazenado.

Realizando-se o aproveitamento energético dos gases de escape da microturbina a eficiência energética do processo fica entre 46,4 a 57,1 %. Comparando com estudo realizado por Coelho *et al* (2006), o custo de geração de energia pela microturbina é altamente elevado, principalmente pelo custo do equipamento. Entretanto o aproveitamento energético dos gases de escape auxilia para a redução dos custos de instalação.

Sugere-se para próximos estudos, a realização de uma análise da carga térmica de refrigeração requerida por tanque de armazenamento de leite e comparar com a carga térmica de refrigeração fornecida pelo resfriador de líquido (chiller), com o objetivo de minimizar o consumo elétrico do resfriador de leite. No mesmo âmbito, pode-se realizar uma análise da carga térmica exigida por um galpão de confinamento de bovinos leiteiros, e comparar com a carga térmica de refrigeração fornecida pelo resfriador de líquido (chiller), com o intuito de melhorar o conforto térmico dos animais, visando o aumento da produtividade leiteira. Outro trabalho importante estaria relacionado com a análise econômica aprofundada da implantação e operação do sistema.

6. BIBLIOGRAFIA

AGÊNCIA EMBRAPA DE INFORMAÇÃO TECNOLÓGICA. Biogás. Disponível em: <<http://www.agencia.cnptia.embrapa.br/gestor/agroenergia/arvore/CONT000fbl23vn102wx5eo0sawqe3qf9d0sy.html>>. Acesso em: 15 de Agosto de 2014.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/capacidadebrasil/operacaocapacidadebrasil.asp>>. Acesso em: 08 de Abril de 2014.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. Resolução Normativa N° 482 - 17 de Abril de 2012. Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br/cedoc/ren2012482.pdf>>. Acesso em: 1 de Julho de 2014.

AMARAL, C. M. C.; AMARAL, L. A.; JÚNIOR, J. L.; NASCIMENTO, A. A.; FERREIRA, D. S.; MACHADO, M. R. F. M. Biodigestão anaeróbia de dejetos de bovinos leiteiros submetidos a diferentes tempos de retenção hidráulica. *Revista Ciência Rural*, v.34, n. 6, p. 1897-1902.-, v. 34, nº 6, Nov/Dez. 2004.

ANDREOS, R. *Estudo de viabilidade técnico-econômica de pequenas centrais de cogeração a gás natural no setor terciário do estado de São Paulo*. 2013, 168 f. Dissertação de Mestrado, Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, 2013.

ASSOCIAÇÃO DE CRIADORES DO MATO GROSSO DO SUL. Assocon estima queda de 13% no confinamento em 2013 - 06 de Setembro de 2013. Disponível em: <<http://www.acrissul.com.br/noticias/ver/7583/assocon-estima-queda-de-13-no-confinamento-em-2013>>. Acesso em: 28 de Junho de 2014.

ATKINSON, B.; MAVITUN, F. *Biochemical engineering and biotechnology handbook*. 2. ed. Basingstoke: Macmillan, 1987.

BARNETT, A.; PYLE, L.; SUBRAMANIAN, S. K. *Biogas technology in the Third World: a multidisciplinary review*. Ottawa: International Development Research Centre, 1978, 132 p.

BARRERA, P. *Biodigestores: Energia, fertilidade e saneamento para zona rural*. 3. ed. São Paulo, SP: Editora Ícone, 1983, 108 p.

BARROS, R. M.; FILHO, G. L. T.; NASCIMENTO, Y. D. S.; GUSHIKEN, E.; CALHEIROS, H. C.; SILVA, F. G. B.; JUNIOR, A. S. Estudo da Produção de Biogás da Digestão Anaeróbica de Esterco Bovino em um Biodigestor. *Revista Brasileira de Energia*, v. 15, n. 2, p. 95-116, 2009.

BAUNGRATZ, K. L.; OLIVEIRA, J. B.; SLONGO, N.; FRIGO, E. P.; ZANON, E. Produção de biogás a partir de biomassa residual. *Revista Acta Iguazu*, v. 2, n. 3, p. 30-39, 2013.

BENGTSSON, S.; HALLQUIST, J.; WERKER, A.; WELANDER, T. Acidogenic fermentation of industrial wastewaters: Effects of chemostat retention time and pH on volatile fatty acids production. *Biochemical Engineering Journal*, v. 3, p. 492 – 499, 2008.

BERNI, J. V. *Fermentação Anaeróbica de Dejetos Bovinos em Biodigestor Canadense: Análise de Macro e Micronutrientes de Biofertilizante*. 2011, 58 f. Trabalho de Graduação, Faculdade de Tecnologia de Araçatuba, Araçatuba, SP, 2011.

BGS. Equipamentos para biogás. Disponível em: <<http://bgsequipamentos.com.br/>>. Acesso em: 8 de Agosto de 2014.

BIOLATINA. Soluções Para Energias Renováveis. Disponível em: <www.biolatina.net.br>. Acesso em: 20 de Março de 2014.

BISWAS, T. D.; KARTHA, A. R. S.; PUNDARIKAKHADU, R. Removal of Carbon Dioxide From Biogás. *Proceedings of national symposium on biogás technology and uses*. Nova Delhi, India: 1977.

BONA, F. S. de; FILHO, E. R. As Microturbinas e a Geração Distribuída. *Encontro de Energia no Meio Rural*, Ano 5, 2004.

BONTURI, G. L.; DIJK, M. V. Instalação de Biodigestores em Pequenas Propriedades Rurais: Análise de Vantagens Socioambientais. *Revista Ciências do Ambiente On Line*, v. 8, n. 2, p. 88-95, 2012.

BUENDÍA, I. M. Biodegradability of meat industry wastes under anaerobic and aerobic conditions. *Water Research*, v. 42, n. 14, p. 3767 - 3764, 2008.

CAMARILLO, M. K.; STRINGFELLOW, W. T.; JUE, M. B.; HANLON, J. S. Economic sustainability of a biomass energy project located at a dairy in California, USA. *Energy Policy*, v. 48, p. 790-798, 2012. Disponível em:<<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301421512005277>>
doi:10.1016/j.enpol.2012.06.020

CAMPOS, A. T. *Introdução Técnica Para o Produtor de Leite: Tratamento e Manejo de Dejetos Bovinos*. Juiz de Fora, MG, Embrapa, 2001.

CAPSTONE TURBINE CORPORATION. Acesso em 20 de Junho de 2014, disponível em <<http://www.capstoneturbine.com>>

CARVALHO, A. M.; SILVA, C. H. F.; LORA, E. E. S.; NASCIMENTO, M. A. R.; VENTURINI, O. J.; ANDRADE, R. V.; COBAS, V. R. M. Microturbinas a Gás, Motores Stirling e Células a Combustível para Geração Distribuída. *Programa P&D CEMIG/ANEEL*, 9 p., 2006.

CASTANÓN, N. J. B. *Biogás, originado a partir dos rejeitos rurais*. 2002, 66 f. Trabalho apresentado na disciplina: Biomassa como Fonte de Energia, Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, 2002.

ÇENGEL Y.; BOLES, M.A. - *Termodinâmica*. 5. ed. McGraw Hill, 2007, 740 p.

CENTRO INTEGRADO DE INFORMAÇÕES AGROMETEOROLÓGICAS. Temperatura média mensal. Acesso em 20 de Junho de 2014, disponível em <http://www.ciiagro.sp.gov.br/ciiagroonline/Quadros/QTmedPeriodo.asp>

CETEC - Fundação Centro Tecnológico de Minas Gerais. *Estado da arte da digestão anaeróbia*, Belo Horizonte, MG, 1982.

CHERNICHARO, C. A. L. *Princípios do Tratamento Biológico de Águas Residuárias: Reatores anaeróbicos*. 1. ed. Belo Horizonte, MG: Editora UFMG, 1997, v. 5, 380 p.

COELHO, S. T.; VELÁZQUEZ, S. M. S. G.; MARTINS, O. S.; ABREU, F. C. A Conversão da Fonte Renovável Biogás em Energia. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE PLANEJAMENTO ENERGÉTICO, 5, 2006, Brasília, DF, Junho de 2006.

COELHO, S. T.; VELÁZQUEZ, S. M. S. G.; MARTINS, O. S.; COSTA, D. F.; BASAGLIA, F.; BACIC, A. C. K. Instalação e Testes de uma Unidade de Demonstração de Geração de Energia Elétrica a partir de Biogás de Tratamento de Esgoto. In: ENCONTRO DE ENERGIA NO MEIO RURAL E GERAÇÃO DISTRIBUÍDA, 5, 2004, Campinas, SP, *Anais em CD-ROM do AgrenerGD*, Outubro de 2004.

COLDEBELLA, A. *Viabilidade do Uso do Biogás da Bovinocultura e Suinocultura para Geração de Energia Elétrica e irrigação em Propriedades Rurais*. 2006, 74 f. Dissertação de Mestrado, Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Cascavel, PR, 2006.

COLDEBELLA, A.; SOUZA, S. N. M.; SOUZA, J.; KOHELER, A. C. Viabilidade de Conversão de Energia Elétrica com Biogás da Bovinocultura de Leite. *Encontro de Energia Meio Rural*, Ano 6, 2006.

COLOMA, E. J.; PRIETO, E, G. *Estudio de Viabilidad de Sistemas de Purificación y Aprovechamiento de Biogás: Capítulo 6 Microturbinas*. Espanha: PSE PROBIOGAS, 2010, 12 p.

COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO. Biogás: Definição. Disponível em: <<http://www.cetesb.sp.gov.br/mudancas-climaticas/biogas/Biogás/17-Definição>>. Acesso em: 03 de Maio de 2014

COMPANHIA PARANAENSE DE ENERGIA. Biomassa. Disponível em: <<http://www.copel.com/hpcopel/root/nivel2.jsp?endereco=%2Fhpcopel%2Froot%2Fpagcopel2.nsf%2Fdocs%2F24349F1A246428E1032574240049F201>>. Acesso em 15 de Agosto de 2014.

COSTA, F. C. *Gases combustíveis como alternativas à eletrotermia em aquecimento direto e calor de processo no setor industrial brasileiro*. 2013, 211 f. Trabalho de Doutorado, Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, 2013.

CUETOS, M. J. Anaerobic digestion of solid slaughterhouse waste (SHW) at laboratory scale: Influence of co-digestion with the organic fraction of municipal solid waste (OFMSW). *Biochemical Engineering Journal*, v. 40, n. 1, p. 99 - 106, 2008.

DA COSTA, L. V., MOGHRABI, J. A., SAGULA, A. L., & JUNIOR, J. L. Tratamento anaeróbico da água residuária de frigorífico com uso de biodigestores: utilização de remediadores biológicos para produção de biogás. *Brazilian Journal of Biosystems Engineering* , v. 7, n. 2, p. 77-85, 2013.

DALMAZO, G. S.; BAZI, S. M.; OLIVEIRA, P. A. V. de. *Biodigestores - Cartilha Dia de Campo: suinocultura e meio ambiente: termo de ajuste de condutas da suinocultura*. Concórdia, SC: Embrapa Suínos e Aves, 2009.

DIAZ, G. O. *Análise de sistemas Para o Resfriamento de Leite em Fazendas Leiteiras com o Uso do Biogás Gerado em Projetos MDL*. 2006, 162 f. Dissertação de Mestrado, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, 2006.

DOWNEY, N. E.; MOORE, J. F. Trichostrongylid Contamination of Pasture Fertilized with Cattle Slurry. *Veterinary Record*, London, v. 101, n. 24, p. 487-488, 1977.

ECOGEO. Newsletter - Parceria entre Biolatina e Biosol traz nova tecnologia de microturbina para o Brasil - Maio de 2012. Ano III. nº 5. Disponível em: <http://www.ecogeo.com.br/parceria_entre_biolatina_e_biosol_traz_nova_tecnologia_de_microturbina_para_o_brasil.html>. Acesso em: 01 de Junho de 2014.

EMPRESA DE ENGENHARIA AMBIENTAL LTDA. Curso de Tratamento de Esgoto. Disponível em: <<http://www.comitepcj.sp.gov.br/Paginas.php?CodPagina=67>>. Acesso em: 25 de Abril de 2014.

FENG, C. A pilot plant two-phase anaerobic digestion system for bioenergy recovery from swine wastes and garbage. *Waste Management*, v. 28, n. 10, p. 1827 - 1834, 2008.

FONSECA, L. D., VIEIRA, T. M., LÁZARO, S. F., SILVA, M. L., FERREIRA, A. V., BASTOS, G. A., et al. Eficácia in vitro de extratos aquosos de plantas no controle de nematódeos gastrintestinais de bovinos. *Revista Acta Scientiae Veterinariae*, v. 42, n. 1, p. 1-8, 2014.

FREITAS, J. Z. *Esterqueiras Para Dejetos Bovinos*. Niterói, RJ: Programa Rio Rural, Manual Técnico 04, 2008.

GELAIN, E. R. *Dejetos de Bovinos de Leite no Assentamento Santa Julia - Júlio de Castilhos (RS): Produção e Possibilidade de Uso*. 2011, 66 f. Monografia de Especialização, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS, 2011.

GEOKLOCK. Biodigestor: Crédito de Carbono. Disponível em: <http://www.geoklock.com.br/biodigestor___creditos_de_carbono.html>. Acesso em: 5 de Julho de 2014.

GEOKLOCK. Cogeração. Disponível em: <<http://www.geoklock.com.br/cogeracao.html>>. Acesso em: 2 de Julho de 2014.

GEOKLOCK. Microturbinas. Disponível em: <<http://www.geoklock.com.br/microturbinas.html>>. Acesso em: 2 de Julho de 2014.

GHOSH, S. Kinetics of acid-phase fermentation anaerobic digestion. *Biotechnology Bioengineering*. v. 11, p. 301-313, 1981.

GREGORY, L., ROSSI, R. S., MENDES, J. P., NEUWIRT, N., MARQUES, E. C., MELVILLE, P. A. Ocorrência dos principais agentes bacterianos e parasitários em fezes diarreicas de bezerros búfalos nos estados de São Paulo e Paraná. *Revista Arquivos do Instituto Biológico*, v. 81, n. 2, p. 180-185, 2014. Disponível em:

<<http://www.scielo.br/pdf/aib/v81n2/1808-1657-aib-81-02-00180.pdf>> DOI: 10.1590/1808-1657001122012

GÜNGÖR-DEMIRCI, G.; DEMIRER, G.N. Effect of initial COD concentration, nutrient addition, temperature and microbial acclimation on anaerobic treatability of broiler and cattle manure. *Bioresource Technology*, v. 93, n. 2, p. 109-117, 2004.

HAANDEL, A. C. V.; LETTINGA, G. *Tratamento Anaeróbico de Esgotos: Um Manual Para Regiões de Clima Quente*. Campina Grande, PB: Epgraf, 1994, 240 p.

HAMILTON, S. L. *Microturbine Generator Handbook*. PennWell Corporation, 2003, 204 p.

HARDOIM, P. C.; GONÇALVES, A. D. M. A. Avaliação do Potencial do Emprego do Biogás nos Equipamentos Utilizados nos Sistemas de Produção de Leite. *Encontro de Energia no Meio Rural*, Ano 3, 2003.

HARRIS, D. C. *Análise química quantitativa*. 6. ed. Rio de Janeiro, RJ: LTC, 2005, 876 p.

ICLEI *Manual Para Aproveitamento de Biogás - Volume 1*. São Paulo, SP: 2009, 80 p.

INGERSOLL-RAND. Microturbine, Microturbine Systems and Recuperators. Disponível em:

<<http://www.ingersollrandproducts.com/am-en/products/microturbines-and-recuperators>>.

Acesso em: 2 de Julho de 2014.

JORGE, L. C. *Estudo de Viabilidade de Implantação de Biodigestores Anaeróbicos no Município de Paty de Alferes - RJ, Uma Contribuição Para Minimizar a Degradação Ambiental na Área Rural*. 2004, 60 f. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal Fluminense, Niterói, RJ, 2004.

JUNIOR, J. L., AMORIM, A. C. Manejo de Dejetos: Fundamentos para a integração e agregação de valor. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ZOOTECNIA, 15, 2005, Campo Grande, MS, *Anais do congresso*, 33 p.

JÚNIOR, M. A. P. O.; ORRICO, A. C. A.; JÚNIOR, J. L.; SAMPAIO, A. A. M.; FERNANDES, A. R. M.; OLIVEIRA, E. A. Biodigestão anaeróbia dos dejetos da bovinocultura de corte: influência do período, do genótipo e da dieta. *Revista Brasileira de Zootecnia*, v. 41, n. 6, p. 1533-1538, 2012.

KAPDI, S. S.; VIJAY, V. K.; RAJESH, S. K.; PRASAD R. Biogas Scrubbing, Compression and Storage: Perspective and Prospectus in Indian Context. *Renewable Energy*, v. 30, n. 8, p. 1195 – 1202, 2005.

KELLEHER, B. P.; LEAHY, J. J.; HENIHAN, A. M.; O'DWYER, T. F.; SUTTON, D.; LEAHY, M. J. Advances in poultry litter disposal technology – a review. *Bioresource Technology*, v. 83, n. 1, p. 27-36, 2002.

KIMMING, M.; SUNDBERG, C.; NORDBERG, Å.; BAKY, A.; BERNESSON, S.; HANSSON, P. A. Replacing fossil energy for organic milk production – potential biomass sources and greenhouse gas emission reductions. *Journal of Cleaner Production*, 2014. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652614002650>> doi:10.1016/j.jclepro.2014.03.044

LEHNINGER, A. L. *Bioquímica: Catabolismo e a Produção da Energia das Ligações de Fosfato*. 2. ed. São Paulo, SP: Edgard Blücher, 1976, v. 2, p. 437 - 596.

LETTINGA, G.; RINZEMA, A. Anaerobic Treatment Of Sulfate Containing Wastewater. In *Bioenvironmental System*, 1985.

LIMA, A. G. G. *Curso de Geração de Energia Elétrica*. Rio de Janeiro, RJ, Faculdade de Engenharia da Universidade Estadual do Rio de Janeiro, 2008. Disponível em: <<http://www.antoniolima.web.br.com/arquivos/podercalorifico.htm>>. Acesso em: 15 de Agosto de 2014.

LS GROUP. Disponível em:<<http://www.lsholdings.com/en/main/index.asp>>. Acesso em: 18 de Julho de 2014.

MAIA, G. N.; BAZZO, E.; MATELLI, J. A. Resultados experimentais de uma planta de cogeração de pequena escala baseada em microturbina a gás natural. In: RIO OIL & GAS EXPO AND CONFERENCE, 7, 2006, Rio de Janeiro, RJ, 2006.

MALAVOLTA, E. O futuro da nutrição de plantas tendo em vista aspectos agronômicos, econômicos e ambientais. *Internacional Plant Nutrition Institute*, Piracicaba, SP: n. 121, 2008, 10p.

MANYI-LOH, C. E.; MAMPHWELI, S. N.; MEYER, E. L.; OKOH, A. I.; MAKAKA, G.; SIMON, M. Investigation into the Biogas Production Potential of Dairy Cattle Manure. *Journal of Clean Energy Technologies*, v. 3, n. 5, p. 326-331, 2015. Disponível em: <<http://www.jocet.org/papers/217-CE017.pdf>> DOI: 10.7763/JOCET.2015.V3.217

MARTINS, F. M.; OLIVEIRA, P. A. V. Análise econômica da geração de energia elétrica a partir do biogás na suinocultura. *Revista Engenharia Agrícola*, v. 31, n.3, p. 477-486, 2011.

MARTINS, R. V. O Biogás. 2003. 5p. Disponível em: <<http://www.hydor.eng.br/PAGINAS-P/P21-P.html>>. Acesso em: 08 março de 2014.

MEHRER. Acesso em 20 de Junho de 2014, disponível em <<http://www.mehrer.de/en/homepage/>>

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. Biocombustíveis. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/clima/energia/energias-renovaveis/biocombustiveis>>. Acesso em: 06 de Abril de 2014.

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. Biomassa. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/clima/energia/energias-renovaveis/biomassa>>. Acesso em: 06 de Abril de 2014.

MONTEIRO, C. *Microturbinas: Produção e Transporte de Energia II*. Porto, PT, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2004. Disponível em: <http://paginas.fe.up.pt/~fmb/PTE2/Apontamentos%20PTE2/PTE2_Microturbinas.pdf>. Acesso em: 17 de Junho de 2014.

MOURA, N. R.; FREIRE, L. G. M., Estudo da viabilidade técnica de uma bancada de cogeração baseada em uma microturbina à gás natural. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE P&D EM PETRÓLEO E GÁS, 3, 2005, Salvador, BA. *Anais do congresso*, 6 p.

MULTITEK. Estudios y Proyectos de Ingeniería. Disponível em <<http://www.multitekingenieros.com/auditorias>>. Acesso em: 18 de Junho de 2014.

NETO, J. T. P. Tratamento, Reciclagem e Impacto Ambiental de Dejetos Agrícolas. In: CONFERÊNCIA SOBRE AGRICULTURA E MEIO AMBIENTE, 1, 1992, Viçosa, MG, *Anais de congresso*, Viçosa: UFV-NEPEMA, 1994. p.61-74

NISHIMURA, R. *Análise De Balanço Energético De Sistema De Produção De Biogás Em Granja De Suínos: Implementação De Aplicativo Computacional*. 2009, 97 f. Dissertação de mestrado, Universidade Federal de Mato Grosso do Sul, Campo Grande, MS, 2009.

NOGUEIRA, L. A. H. *Biodigestão: A Alternativa Energética*. São Paulo, SP: Nobel, 1986, 92 p.

- OLIVER, A. P. M.; NETO, A. A. S.; QUADROS, D. G.; VALLADARES, R. E. *Manual de Treinamento em Biodigestão*. Salvador, BA, Instituto Winrock, 2008. Disponível em: < <http://wp2.oktiva.com.br/ider/files/2010/01/16.Manual-de-Treinamento-em-Biodigestao.pdf> >. Acesso em: 17 de Junho de 2014.
- PAULA, A. N. DE *Biogás: O Combustível do Futuro*. 2006, 62 f. Monografia, Universidade Federal de Lavras, Lavras, MG, 2006.
- QUADROS, D. G. *Confinamento de Bovinos de Corte*. Barreiras, BA, 1997, Universidade Estadual da Bahia, 31 p.
- RAUTENBACH, R.; ETHRESMANN, E.; WAYER, H. Removal of Carbon Dioxide From Fermentation Gas By Membrane Separation. *Chemical Abstract*, p. 107(14) - 154, 1987.
- RIBEIRO, G.M.; SAMPAIO, A. A. M.; FERNANDES, A. R. M.; HENRIQUE, W.; SUGOHARA, A.; AMORIM, A. C. Efeito da Fonte Protéica e do Processamento Físico do Concentrado Sobre a Terminação de Bovinos Jovens Confinados e o Impacto Ambiental dos Dejetos. *Revista Brasileira de Zootecnia*, v. 36, n. 6, p. 2082-2091, 2007
- ROCHA, M. S.; ANDREOS, R. MOREIRA, J. R. S. Performance tests of two small trigeneration pilot plants. *Applied Thermal Engineering* , v. 41, p. 84-91, 2012.
- SALOMOM, K. R. *Avaliação Técnico-Econômica e Ambiental da Utilização do Biogás Proveniente da Biodigestão da Vinhaça em Tecnologias Para Geração de Eletricidade*. 2007, 247 f. Tese de Doutorado, Universidade Federal de Itajubá - Itajubá, MG, Novembro, 2007.
- SALOMOM, K. R.; FILHO G. L. T. *Série Energia Renováveis: Biomassa*. 1. ed. Itajubá, MG: Ministério de Minas e Energia, 2007, 36 p.
- SAM-SOON, P. A. L. N. S. Hypothesis for Pelletization in the Upflow Anaerobic Sludge Bed Reactor. *Water SA*, Petroria, ZA, v. 13, n. 2, p. 69-80, 1987.
- SANTOS, I. A.; MORAIS, M.A. Aproveitamento do Biogás Para Geração de Energia Elétrica a Partir de Dejetos de Bovinos Leiteiros: Um Estudo de Caso na EAFMUZ. In: SIMPÓSIO INTERNACIONAL SOBRE GERENCIAMENTO DE RESÍDUOS DE ANIMAIS, 1, 2009, Florianópolis, SC, *Anais de congresso*, Março de 2009.
- SANTOS, P. *Guia técnico de biogás. Portugal*. 5. ed. Gülzow, DE, 2010, 236 p.

SEDIYAMA, M. A. N.; VIDIGAL, S. M.; PEDROSA, M. W.; PINTO, C. L. O.; SALGADO, L. T. Fermentação de Esterco de Suínos Para Uso Como Adubo Orgânico. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 12, n. 6, p. 638-644, 2008

SHIH, J. C. H. Destruction of Enteric Pathogens in the Thermophilic Poultry Wast Digester. *Poultry Science*, v. 63, p. 181-182, 1984.

SILVA, W. R. *Estudo Cinético do Processo de Digestão Anaeróbia de Resíduos Sólidos Vegetais*. 2009, 2001 f. Tese de Doutorado, Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, PB, 2009.

SINGH, K.; JASH, T. Performance analysis of micro turbine-based grid-connected biogas power plant in Purulia in West Bengal, India. *Clean Techn Environ Policy*, v. 17, n. 3, p. 789-795, 2015.

SOARES, H. M. *Digestão Anaeróbica de Efluentes de Fábricas de Cervejas e Refrigerantes em Reator Tipo Fluxo Ascendente com Manta de Lodo (UASB)*. 1990, 46 f. Dissertação de Mestrado, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 1990.

SOUZA, S. N. M.; PEREIRA, W. C.; NOGUEIRA, C. E. C.; PAVAN, A. A.; SORDI, A. Custo da eletricidade gerada em conjunto motor gerador utilizando biogás da suinocultura. *Technology Acta Scientiarum*, Maringá, v. 26, n. 2, p.127-133, 2004.

TECPAR – INSTITUTO DE TECNOLOGIA DO PARANÁ. *Manual de Biosistemas Integrados na Suinocultura*. Curitiba, PR, 2002, 140 p.

UTEMBERGUE, B. L.; AFONSO, E. R.; PEREIRA, A. S. C. Manejo de Dejetos em Confinamento de Bovinos de Corte. In: SIMPÓSIO DE SUSTENTABILIDADE E CIÊNCIA ANIMAL, 3, 2013, Pirassununga, SP, *Anais de congresso*

VEEKEN, A.; KALYUZHNYI, S.; SCHARFF, H.; HAMELERS, B. Effect of pH and VFA on hydrolysis of organic solid waste. *Journal of Environmental Engineering*, v. 126, n. 12, p. 1076 - 1081, 2000.

VIEIRA, A. A., COSTA, P. M. A., LOPES, D. C.; PEREIRA, J. A. A.; MELLO, H. V. de. Substituição do milho por dejetos de bovinos, em rações para suínos, recebendo caldo de cana-de-açúcar. *Revista da Sociedade Brasileira de Zootecnia*, v. 20, n. 1, p. 01-13, 1991.

WHITE, A. J.; KIRK, D. W.; GRAYDON, J. W. Analysis of small-scale biogas utilization systems on Ontario cattle farms. *Renewable Energy*, v.36, n.3, p. 1019-1025, 2011.

Disponível em: < <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960148110004052>>
doi:10.1016/j.renene.2010.08.034

YABE, N. Environmental and economic evaluations of centralized biogas plants running on cow manure in Hokkaido, Japan. *Biomass and Bioenergy*, v.49, p. 143-151, 2013. Disponível em: < <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0961953412004990>>
doi:10.1016/j.biombioe.2012.12.001

YINGJIAN, L.; QI, Q.; XIANGZHU, H.; JIEZHI, L. *Energy use project and conversion efficiency analysis on biogas produced in breweries.*. In: WORLD RENEWABLE ENERGY CONGRESS. 2011. Sweden.