

RAFAEL DELÉO E OLIVEIRA

**GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA A
PARTIR DO BIOGÁS PRODUZIDO PELA
FERMENTAÇÃO ANAERÓBIA DE
DEJETOS EM ABATEDOURO E AS
POSSIBILIDADES NO MERCADO DE
CARBONO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à
Escola de Engenharia de São Carlos, da
Universidade de São Paulo.

Curso de Engenharia Elétrica com ênfase em
Sistemas de Energia e Automação.

Orientador: Prof. Dr. José Carlos de Melo Vieira Júnior

São Carlos
2009

AUTORIZO A REPRODUÇÃO E DIVULGAÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO, POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

Ficha catalográfica preparada pela Seção de Tratamento
da Informação do Serviço de Biblioteca – EESC/USP

048g

Oliveira, Rafael Deléo e

Geração de energia elétrica a partir do biogás produzido pela fermentação anaeróbia de dejetos em abatedouro e as possibilidades no mercado de carbono / Rafael Deléo e Oliveira ; orientador José Carlos de Melo Vieira Júnior. -- São Carlos, 2009.

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Elétrica com ênfase em Sistemas de Energia e Automação) -- Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, 2009.

1. Biodigestores. 2. Biogás. 3. Geração de energia elétrica. 4. Mercado de carbono. 5. Mecanismo de desenvolvimento limpo. 6. Águas residuárias de abatedouros. I. Título.

FOLHA DE APROVAÇÃO

Nome: Rafael Deléo e Oliveira

Título: "Geração de Energia Elétrica a partir do Biogás Produzido pela Fermentação Anaeróbia de Dejetos em Abatedouro e as Possibilidades no Mercado de Carbono"

Trabalho de Conclusão de Curso defendido e aprovado
em 4 / 12 / 2009,

com NOTA 9,5 (nove, cinco), pela comissão julgadora:



Prof. Dr. Adriano Alber de França Mendes Carneiro - EESC/USP



Dr. Ronan Cleber Contrera - EESC/USP

Prof. Associado Homero Schiabel
Coordenador da CoC-Engenharia Elétrica
EESC/USP

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho a toda minha família, em especial aos meus pais, Paulo Roberto de Oliveira e Maria Cristina Deléo e Oliveira, e a minha namorada, Juliana de Almeida.

AGRADECIMENTOS

A Deus que sempre guiou e guia meus passos na superação de todas as adversidades.

Ao meu orientador, professor Dr. José Carlos de Melo Vieira Júnior, pela contribuição com seus conhecimentos, orientação, atenção e acima de tudo confiança no trabalho desenvolvido.

“Se você não puder ser uma árvore frondosa no alto de uma montanha. Seja um pequeno arbusto na beira do rio. Mas seja o melhor arbusto que você puder ser.”

(D. Mallock)

SUMÁRIO

1 – Introdução.....	1
2 – Objetivos e organização.....	5
2.1 – Objetivo geral.....	5
2.2 – Objetivo específico	5
2.3 – Organização deste documento	5
3 – O biogás.....	7
3.1 - Purificação do biogás.....	9
3.1.1 – Remoção de umidade	10
3.1.2 – Retirada de gás sulfídrico por óxido férrico	10
3.1.3 – Remoção de gás carbônico	10
3.1.4 – Remoção de gás sulfídrico e gás carbônico por hidróxido de sódio (NaOH), potássio (KOH) ou cálcio [Ca(OH) ₂].....	11
3.2 - Poder calorífico.....	12
3.3 - Aplicações do biogás	14
3.3.1 – Emprego do biogás na produção de vapor	15
3.3.2 – Emprego do biogás para geração de energia elétrica.....	15
3.3.3 – Emprego do biogás como matéria-prima para a indústria	15
3.3.4 – Emprego do biogás como combustível veicular.....	16
4 – O biofertilizante	17
5 – Microbiologia e bioquímica na produção do biogás	19
5.1 – Digestão anaeróbia	20
5.1.1 – Bactérias hidrolíticas fermentativas	21
5.1.2 – Bactérias acetogênicas produtoras de hidrogênio	21
5.1.3 – Bactérias homoacetogênicas	22
5.1.4 – Árqueas metanogênicas	22
5.1.5 – Bactérias sulfetogênicas	22
5.2 – Fatores que influenciam na digestão anaeróbia.....	23
5.2.1 – Quantidade de matéria seca (MS)	23
5.2.2 – Concentração de nutrientes	23
5.2.3 – pH – Acidez ou Alcalinidade.....	24
5.2.4 – Temperatura interna do biodigestor	24
5.2.5 – Tempo de retenção hidráulica (TRH)	25
5.2.6 – Concentração de sólidos voláteis (SV)	25
5.2.7 – Presença de substâncias tóxicas	26
5.2.8 – Relação carbono/nitrogênio	26
6 – Biodigestor	27
6.1 - Quanto ao fornecimento de gás.....	28
6.1.1 – Biodigestor contínuo	28
6.1.1.1 – Biodigestor tipo Indiano	28
6.1.1.2 – Biodigestor tipo Chinês	30
6.1.1.3 – Biodigestor modelo Marinha Brasileira	32
6.1.2 – Biodigestor tipo Batelada.....	35
6.2 – Outros modelos de biodigestores	37
7 – Produção de biogás em abatedouros/frigoríficos.....	39
7.1 – Geração de energia elétrica a partir do biogás	43
7.2 – Dimensionamento do biodigestor	51
7.2.1 – Determinação do consumo diário de biogás	52

7.2.2 – Determinação do período crítico	52
7.2.3 – Determinação do consumo de biogás durante o período crítico ($V_{c_{pc}}$)	52
7.2.4 – Determinação do volume de biogás que deverá estar armazenado no início do período crítico de consumo ($V_{arm_{pc}}$).....	53
7.2.5 – Determinação do volume de biogás produzido durante o período que não há consumo	54
7.3 – Dimensionamento do biodigestor contínuo	54
7.4 – Comercialização do biofertilizante	57
8 – Redução de emissão de gases de efeito estufa (GEE).....	59
8.1 – Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL)	61
8.2 – Crédito de carbono.....	64
8.3 – Mercado de carbono no Brasil e no mundo	65
8.4 – Redução de emissão de GEE no abatedouro e geração de créditos de carbono	68
9 – Conclusões.....	73
Referências bibliográficas	75

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Biodigestor tipo Indiano.....	29
Figura 2 – Representação tridimensional em corte do biodigestor tipo Indiano.....	30
Figura 3 – Biodigestor tipo Chinês.....	31
Figura 4 – Representação tridimensional em corte do biodigestor tipo Chinês.....	32
Figura 5 – Representação em corte de um biodigestor modelo Marinha.	33
Figura 6 – Representação de biodigestor modelo Marinha sem paredes divisórias internas.	34
Figura 7 – Biodigestor de 300 m ³	34
Figura 8 – Biodigestor tipo Batelada.....	36
Figura 9 – Representação tridimensional em corte do biodigestor tipo Batelada.....	37
Figura 10 – Número de Atividades de Projeto do MDL.	65
Figura 11 – Total de atividades de projeto do MDL no mundo (3981).....	66
Figura 12 – Reduções de emissões de CO ₂ e (1º período de obtenção de créditos).	66
Figura 13 – Reduções de emissões anuais (tCO ₂ e).....	67
Figura 14 – Reduções de emissões anuais projetadas para o primeiro período de obtenção de créditos.....	67
Figura 15 – Número de atividades de projetos de MDL no Brasil por estado.....	68

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Matérias primas: fontes de resíduos	9
Tabela 2 – Propriedades físicas e químicas do metano	12
Tabela 3 – Poder calorífico de alguns combustíveis	13
Tabela 4 – Comparação entre diferentes fontes energéticas e biogás	13
Tabela 5 – Equivalência energética do biogás (1 m ³) comparada a outras fontes de energia	14
Tabela 6 – Consumo de biogás por aplicação	15
Tabela 7 – Comparação entre três modelos de biodigestores (adaptado).....	38
Tabela 8 – Produtos e subprodutos do abate de um bovino de 400 kg	39
Tabela 9 – Diferentes substratos para digestores e sua conversão em biogás	39
Tabela 10 – Quantidade de animais abatidos mensalmente	40
Tabela 11 – Animais abatidos diariamente a cada mês	40
Tabela 12 – Biogás produzido diariamente	41
Tabela 13 – Período de retorno simples e descontado	50
Tabela 14 – Cálculo do custo do ciclo de vida anualizado (CCVA).....	50
Tabela 15 – Temperatura da região de Lupércio	71

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AGV	Ácidos Graxos Voláteis
AND	Autoridade Nacional Designada
BM&F	Bolsa de Mercadorias e Futuro
CaCO ₃	Carbonato de cálcio
CE	Conselho Executivo
CETESB	Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental
CFC	Cloro-Flúor-Carbono
CH ₄	Metano
CH ₃ COOH	Ácido acético
CH ₃ COONa	Acetato de sódio
CIMGC	Comissão Interministerial de Mudança Global do Clima
CO	Monóxido de Carbono
CO ₂	Dióxido de carbono ou gás carbônico
COP	Conference Of the Parties (Conferência das Partes)
DCP	Documento de Concepção de Projeto
DOU	Diário Oficial da União
EIA	Estudo de Impacto Ambiental
EOD	Entidade Operacional Designada
ETE	Estação de Tratamento de Esgoto
Fe ₂ O ₃	Óxido de ferro III
GEE/GHC	Gás de Efeito Estufa/ <i>Greenhouse Gás</i>
GLP	Gás Liquefeito de Petróleo
GWP	<i>Global Warming Potential</i> (potencial de dano global)
H ₂	Hidrogênio
HFC	Hidrofluorcarbono
H ₂ CO ₃	Ácido carbônico
H ₂ S	Ácido sulfídrico ou gás sulfídrico
IPqM	Instituto de Pesquisa da Marinha do Brasil
K ₂ CO ₃	Carbonato de potássio
KHCO ₃	Bicarbonato de potássio
KOH	Hidróxido de potássio
MDL	Mecanismo de Desenvolvimento Limpo
MS	Matéria Seca (%)
MO	Matéria Orgânica (%)
N ₂	Nitrogênio
Na ₂ CO ₃	Carbonato de sódio
NaHCO ₃	Bicarbonato de sódio
NaOH	Hidróxido de sódio, soda cáustica
NH ₃	Amônia, amoníaco, gás amoníaco
NH ₄ Cl	Cloreto de amônio, sal amoníaco
NO _x	Óxidos de nitrogênio
O ₂	Oxigênio
ONU	Organização das Nações Unidas
PCI/LHV	Poder Calorífico Inferior/Low Heat Value
PCS/HHV	Poder Calorífico Superior/High Heat Value
PFC	Perfluorcarbonos
PVC	Policloreto de vinila

RCE	Redução Certificada de Emissão (crédito de carbono)
RIMA	Relatório de Impacto Ambiental
ST	Sólidos totais (%)
SV	Sólidos Voláteis (%)
SF ₆	Hexafluoreto de enxofre
tCO ₂ e	Tonelada de carbono equivalente
TRH	Tempo de Retenção Hídrica (dias)
Z _n O	Óxido de zinco

RESUMO

O presente trabalho teve por objetivo estudar a viabilidade teórica da geração de energia elétrica utilizando o biogás gerado a partir do tratamento anaeróbio de resíduos de um abatedouro de bovinos situado no município de Lupércio/SP. Dessa forma foram analisados aspectos técnicos, econômicos e ambientais relacionados a um possível projeto.

No sentido técnico, o trabalho aponta a possibilidade de recuperação do biogás gerado através do tratamento anaeróbio dos resíduos com a possibilidade de geração de energia elétrica, utilizando para isso grupos geradores.

Em relação ao aspecto econômico, estudou-se a viabilidade do projeto de geração de energia elétrica de forma independente, além de se estudar a possibilidade de comercialização do biofertilizante, subproduto do tratamento anaeróbio, e da possibilidade de comercialização dos créditos de carbono conseguidos com a queima do biogás, caracterizando um projeto de Mecanismo de Desenvolvimento Limpo, com a intenção de se obter uma rápida amortização do capital investido.

Do ponto de vista ambiental, destaca-se a necessidade de tratamento dos resíduos gerados no abatedouro por imposição de leis ambientais e que acaba sendo conseguido com a utilização de biodigestores, sendo que o material estabilizado pode ser comercializado como biofertilizante.

Palavras-chaves: biodigestor, biogás, geração de energia elétrica, mercado de carbono, mecanismo de desenvolvimento limpo, águas residuárias de abatedouros.

ABSTRACT

This work aimed to study the feasibility of generating electricity using biogas generated from anaerobic treatment of waste from a cattle slaughterhouse located in the city of Lupércio / SP. In this context, technical, economic and environmental aspects were analyzed focusing in the development of a possible project.

In the technical sense, the work suggests the possibility of recovery of the biogas generated by anaerobic treatment of waste with the possibility of generating power, using electrical generators.

Regarding the economic aspect, the feasibility of the project to generate power independently was studied, in addition to the study of the possibility of biofertilizer trading, which is a by-product of anaerobic treatment, and the possibility of carbon credits trading achieved with the biogas combustion. Therefore, such studies feature a project of the Clean Development Mechanism, with the intention of obtaining a fast payback of the capital invested.

From the environmental point of view, there is a need to handle waste generated in the abattoir by imposition of environmental laws and this can be achieved by the use of biodigestor, and the stabilized material can be sold as biofertilizer.

Keywords: biodigestor, biogas, electric power generation, carbon market, clean development mechanism, slaughterhouse wastewater.

1 – Introdução

Para o desenvolvimento sustentável tanto de países desenvolvidos quanto em desenvolvimento é necessária a busca, desenvolvimento e incentivo de tecnologias que utilizem fontes renováveis de energia, possibilitando com isso a criação de fontes de suprimentos descentralizadas e em pequena escala [1]. Destaca-se que a produção de energia elétrica é considerada o setor mais poluente. A produção de energia elétrica através da queima de combustíveis fósseis (termoelétricas) gera resíduos como óxidos de enxofre, óxidos de nitrogênio, dióxido de carbono, metano, monóxido de carbono e particulados. Já as usinas hidroelétricas produzem somente metano, mas a construção das represas com a formação de grandes lagos interfere sobre os fluxos dos rios e implica na realocação das populações atingidas, configurando um grande problema social em muitos casos [2]. Diante disso, é preciso investir em fontes alternativas para promover o desenvolvimento sustentável.

Quando o manejo e o tratamento dado ao efluente produzido em um sistema de produção forem inadequados, o mesmo torna-se uma fonte de contaminação do meio ambiente, caso contrário pode-se reduzir significativamente os impactos ambientais causados por tal efluente. Como por exemplo, em processos que geram efluentes orgânicos, a correta reciclagem do resíduo pode transformá-lo em biofertilizante e até mesmo em biogás, caracterizado por ser uma fonte de energia alternativa de grande potencial na atualidade [1].

O biogás é composto por grande parcela de gás metano (CH_4), que quando lançado na atmosfera apresenta potencial de poluição 21 vezes superior ao dióxido de carbono (CO_2) no que se refere ao efeito estufa, sendo que sua utilização na geração de energia leva a uma redução do potencial de poluição ambiental [3]. A intensificação do efeito estufa é um dos mais graves problemas enfrentados pela humanidade na atualidade, sendo provocada pela alta concentração atmosférica de gases como o dióxido de carbono (CO_2), metano (CH_4), óxido nitroso (N_xO), hidrofluorcarbonos (HFCs), perfluorcarbonos (PFCs) e hexafluoreto de enxofre (SF_6), gases liberados principalmente nas atividades industriais, produção agrícola, desmatamento, queima das coberturas florestais, queima de combustíveis fósseis e tratamento de dejetos [4, 5, 6]. Comparativamente a outros combustíveis fósseis, a queima do metano gera menos poluentes atmosféricos por unidade de energia gerada, por isso, é caracterizado como um combustível limpo e o seu uso em equipamentos, veículos, aplicações industriais e geração de energia tende a aumentar [7].

A utilização do biogás como combustível contempla várias formas de uso, desde motores a explosão interna, passando por aquecimento de caldeiras e fornos e, ainda, podendo ser utilizado em turbinas a gás ou em microturbinas. Mas, para que estes usos possam ocorrer é necessário identificar a vazão, composição química e poder calorífico do biogás gerado, sendo estes os parâmetros que determinam o real potencial de geração de energia tanto na forma de energia elétrica quanto na forma de

calor e trabalho. O conhecimento desses parâmetros também permite dimensionar os processos de pré-tratamento do biogás, como a remoção de ácido sulfídrico (H_2S), do dióxido de carbono (CO_2) e da umidade, com a intenção de aumentar o poder calorífico do gás e também de evitar danos aos equipamentos. Os danos estão relacionados principalmente à corrosão interna dos componentes metálicos das microturbinas e dos motores a explosão provocada pela ação corrosiva do ácido sulfídrico em solução (H_2S) [3].

O processo de formação do biogás recebe o nome de biodigestão, o qual acontece naturalmente com toda matéria orgânica, mas é no biodigestor ou simplesmente digestor que o processo pode ser controlado e os produtos dessa reação capturados e armazenados para posterior utilização. O biodigestor é caracterizado por uma câmara de fermentação, geralmente circular e construída abaixo do nível do solo com a intenção de protegê-la contra as variações climáticas, principalmente variações bruscas da temperatura ambiente. Os projetos de biodigestores podem ser incluídos no chamado Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL) que visa à redução de emissões de gases de efeito estufa (GEE) [4, 8]. As reduções de emissões, principalmente de gás metano, atingidas com o projeto de tratamento de efluentes orgânicos e posterior queima do gás para geração de energia elétrica podem ser comercializadas como créditos de carbono. A comercialização desses créditos pode ser utilizada para pagamento parcial do investimento inicial da instalação do biodigestor e grupo geradores, garantindo assim um abatimento do investimento mais rápido e um retorno em menor tempo. Dentro deste contexto, biodigestores têm sido instalados em diversas atividades, tais como granjas de suinocultura, granjas de avicultura, frigoríficos, abatedouros, etc.

Dentre os vários tipos de atividades que podem empregar biodigestores, este trabalho tem como foco estudar a viabilidade de geração de energia elétrica utilizando o biogás gerado a partir do tratamento anaeróbico de resíduos em abatedouros de bovinos. Como a atividade de abatedouros é muito expressiva na agroindústria brasileira instalada e conseqüentemente a geração de resíduos é muito alta, fica clara a necessidade de se prover o tratamento de tais dejetos para garantir com isso a manutenção dos recursos hídricos que muitas vezes recebem grande parte desse material sem nenhum tratamento. Nessa tarefa de realizar o tratamento dos efluentes orgânicos, o biodigestor é um forte aliado que além de promover a estabilização do material, que pode ser utilizado como biofertilizante, acaba produzindo gás metano, que pode ser utilizado na geração de energia. Assim, com a utilização de tal equipamento é realizado o tratamento dos resíduos com a possível geração de divisas, através da venda do biofertilizante, além da possibilidade de geração de energia elétrica e térmica para aproveitamento dentro do abatedouro.

A biodigestão anaeróbia para o tratamento de resíduos de abatedouros é descrita na literatura em alguns trabalhos [7, 9, 10], sendo caracterizada como uma promissora fonte alternativa de energia. Isso se deve a altas taxas de remoção da matéria orgânica que garantem a estabilização do efluente, que pode ser

posteriormente utilizado como biofertilizante e também pela produção de gás metano, que por suas características carburantes pode ser utilizado como fonte de energia [7]. De acordo com a concentração do gás metano presente no biogás o poder calorífico pode variar entre 4,95 e 7,92 kWh/m³, poder calorífico inferior (PCI) ou *low heat value* (LHV) e poder calorífico superior (PCS) ou *high heat value* (HHV), respectivamente, mas uma vez efetuada a purificação da mistura gasosa com a eliminação principalmente da água e do dióxido de carbono, este valor pode variar entre 9,94 kWh/m³ e 11,07 kWh/m³ [1, 9, 10, 11, 12, 13].

2 – Objetivos e organização

2.1 – Objetivo geral

Este trabalho teve como objetivo geral estudar a possibilidade de geração de energia elétrica através da queima do biogás gerado pelo tratamento de efluente de abatedouro em biodigestor.

2.2 – Objetivos específicos

Os objetivos específicos foram estudar a possibilidade de geração de biogás através da biodigestão de efluente de abatedouro em biodigestores, a inclusão do projeto na categoria de Mecanismo de Desenvolvimento Limpo no âmbito do protocolo de Quioto, analisando dessa forma a possibilidade de obtenção de créditos de carbono, e também da possibilidade de comercialização do biofertilizante gerado durante o processo de biodigestão, que juntamente com a comercialização dos créditos de carbono podem reduzir o tempo de retorno do investimento.

2.3 – Organização deste documento

No capítulo introdutório é traçado um panorama geral sobre a necessidade e importância do tratamento adequado de efluentes industriais no combate à poluição do planeta e ao aquecimento global. É abordada a possibilidade de geração de biogás através do tratamento anaeróbio dos efluentes industriais e a sua utilização como combustível contemplando várias formas de uso.

O segundo capítulo define o que vem a ser o biogás e suas características químicas, dando ênfase ao poder calorífico apresentado pelo mesmo. São abordadas técnicas que visam purificar a mistura gasosa chamada de biogás objetivando aumentar o poder calorífico da mesma e também evitar problemas de corrosão causada pela presença de substâncias nocivas aos motores de explosão interna (motogeradores) e microturbinas. Por fim, são abordados alguns aspectos relacionados ao emprego do biogás que vão desde a produção de vapor em caldeiras à matéria prima para a indústria.

No terceiro capítulo é abordada a produção de biofertilizante que vem a ser um subproduto da biodigestão dos efluentes industriais, sendo caracterizado como uma mistura rica em micro e macronutrientes necessários ao desenvolvimento das plantas e por isso um substituto aos adubos nitrogenados químicos.

A microbiologia e bioquímica envolvidas na produção de biogás são abordadas no quarto capítulo, em que é definido o que vem a ser a digestão anaeróbia e os fatores que a influenciam diretamente.

A abordagem do que vem a ser o biodigestor e os tipos mais difundidos pelo mundo, trazendo um breve histórico sobre o surgimento de cada um e os motivos de seus desenvolvimentos é feita no quinto capítulo.

A abordagem do caso em estudo é feita no sexto capítulo quando é justificada a escolha do modelo de biodigestor mais adequado ao caso e é realizado o dimensionamento do mesmo. Também é realizado o dimensionamento do sistema de geração de energia elétrica, determinado o consumo de biogás pelo sistema de geração de energia elétrica e a produção de energia elétrica segundo o volume de biogás disponível.

Já o sétimo capítulo apresenta uma análise sobre os gases de efeito estufa, o Mecanismo de Desenvolvimento Limpo, os créditos de carbono e traça um panorama geral sobre o mercado de carbono no Brasil e no mundo. Para finalizar é feita uma análise das possibilidades de geração de créditos de carbono no abatedouro foco do estudo e as possibilidades econômicas geradas pela comercialização dos créditos.

O oitavo capítulo apresenta os resultados e trata das conclusões acerca das possibilidades econômicas geradas pelo projeto de instalação do biodigestor no tratamento de efluentes de abatedouro.

As referências estudadas e utilizadas para a realização deste trabalho são apresentadas no nono capítulo.

3 – O Biogás

Foi um gás descoberto no século XVIII por Alessandro Volta e que começou a ser produzido em larga escala em biodigestores espalhados pela China e Índia com a intenção de atender as necessidades energéticas na zona rural [14].

Ao contrário do álcool da cana de açúcar e de óleos extraídos de outras culturas, tais como o milho, a soja e a mamona, o biogás não compete por espaço com outras culturas, e assim não coloca a produção de alimentos em risco. Isso se deve ao fato de que o biogás pode ser obtido a partir de resíduos agrícolas, excremento de animais e do Homem, a partir do lixo urbano (orgânico), como já ocorre nos chamados aterros sanitários de grande parte dos países desenvolvidos e cuja tecnologia começa a ser implantada em algumas cidades brasileiras e, também, de resíduos industriais [15].

Um fato que deve ser observado é que grande parte da energia armazenada na biomassa é perdida para a atmosfera na forma de gases e de calor, através do processo de decomposição. Toda matéria viva, após a morte, é decomposta por microorganismos (bactérias). Durante esse processo de decomposição, as bactérias retiram da biomassa parte das substâncias de que necessitam para a manutenção da sua sobrevivência e, em contrapartida, lançam na atmosfera gás e calor. Esse gás é o chamado biogás, uma fonte de energia abundante, não poluidora e barata [15].

A utilização desse gás em larga escala permitiria que a humanidade reduzisse drasticamente o consumo de petróleo, sendo que esta redução somada à não emissão direta na atmosfera do biogás se tornariam ferramentas contra o combate à emissão de gases de efeito estufa e conseqüentemente mitigadoras do aquecimento global.

Há algumas décadas, o aproveitamento do biogás foi um método adotado pelos países desenvolvidos como consequência da melhora do tratamento dado aos resíduos orgânicos visando uma melhoria no saneamento ambiental. As estações de tratamento que geram biogás passaram a ser tratadas como Plantas de Biogás, onde o principal produto é o biogás gerado, sendo o tratamento ou saneamento visto como subproduto [16]. Essas plantas de biogás já são empregadas nos países desenvolvidos há mais de 30 anos, em diversas configurações e escalas, constituindo uma forma eficiente de tratamento de resíduos orgânicos de origem doméstica, rural ou industrial e que promovem o uso racional do poder energético contido no gás gerado e do alto teor de nutrientes contido no material orgânico pós-tratamento [16].

No Brasil, durante o período da crise energética na década de 70, a busca por energias alternativas despertou o interesse em aplicar a tecnologia da biodigestão anaeróbia [17]. Mas, atualmente, o interesse maior está relacionado à sua capacidade de estabilização de resíduos, devido à necessidade cada vez maior de preservação do meio ambiente [18].

Todos os processos de tratamento de efluentes baseados em processos biológicos ou que envolvam alguma unidade de biodigestão são potenciais geradores de biogás, por exemplo, sistema de reator anaeróbio de fluxo ascendente (UASB), filtro anaeróbio, lagoas anaeróbias, lagoas facultativas, entre outros. Deve-se ressaltar que é possível o tratamento de efluentes industriais conjuntamente com resíduos domésticos, visando à economia de escala e o processo de tratamento [16].

O biogás é um subproduto da biodigestão, atinge somente de 4 a 7% do peso da matéria orgânica (MO) inicial utilizada no processo [11]. É resultado da digestão anaeróbia, fermentação na ausência de oxigênio, de material orgânico presente em dejetos de animais, resíduos vegetais, lixo orgânicos residenciais, efluentes ou lixo industrial como vinhaça, restos de abatedouros e frigoríficos, curtumes e fábricas de alimento, lodo de esgoto, em condições adequadas de umidade, temperatura, agitação da massa, alcalinidade e pH do composto [3, 12, 16, 19]. É uma mistura de gases contendo principalmente gás metano (CH_4) e dióxido de carbono (CO_2). Contém em menor quantidade nitrogênio (N_2), hidrogênio (H_2) e gás sulfídrico (H_2S) [12, 15, 20, 21]. O metano não tem cheiro, cor ou sabor, mas o gás sulfídrico tem cheiro semelhante ao de ovo podre e isso confere a mistura gasosa (biogás) um odor muito discreto. Após o gás ser utilizado na queima, esse odor desaparece [15].

A porcentagem dos gases constituintes do biogás pode variar dependendo do material utilizado na decomposição e da eficiência do biodigestor. O gás metano representa algo entre 40 a 80% vol., o dióxido de carbono algo entre 20 a 60% vol. [11, 12, 13, 16, 21, 22, 23]. Já o nitrogênio representa algo entre 0,5 a 3% vol. enquanto que o hidrogênio está presente na composição perfazendo algo entre 1 a 10% vol. e o monóxido de carbono (CO) apenas 0,1% vol., o gás sulfídrico (H_2S) apresenta traços na composição do biogás e o oxigênio (O_2) representa apenas 1% vol. [22, 23].

Como consequência do alto teor de metano, o biogás é um ótimo gás para geração de energia térmica e para ser utilizado em motores a explosão [11].

Na Tabela 1 são apresentadas algumas matérias primas capazes de gerar biogás quando submetidas ao processo de biodigestão natural ou artificial (biodigestores).

Tabela 1 – Matérias primas: fontes de resíduos

Algumas matérias primas – fontes de resíduo
Fezes de suínos
Papel e jornais
Sobras de comida
Fezes de aves
Soro de queijo
Resíduos de grãos
Capins
Resíduos de cervejaria
Fezes de bovinos
Resíduos de abatedouro
Fezes de coelho
Lixo urbano, esgoto

Fonte: Gryscek e Belo, 1983 [9].

O material ou resíduo do qual é retirado o gás é um substrato devidamente equilibrado com diluição em água, o qual é um meio para a instalação e desenvolvimento de várias espécies de microorganismos (bactérias) envolvidos no processo de fermentação [9].

Cada matéria prima ou fonte de resíduo terá um potencial de geração de biogás. Resíduos altamente fibrosos (bagaço de cana, casca de arroz), considerados de baixa digestibilidade, apresentam potencial mais reduzido. Já materiais ricos em amido (restos de grãos ou grãos deteriorados), proteína (restos e sangue de abatedouro), celulose (gramíneas) e carboidratos apresentam um potencial mais elevado de produção do biogás [9].

Para aumentar o poder calorífico, rendimento térmico e eliminar a característica corrosiva devido à presença de gás sulfídrico e água, é preciso tratar e purificar o biogás produzido conforme explicado nas seções seguintes [11].

3.1 - Purificação do biogás

Dependendo de qual for a aplicação do gás produzido, o mesmo deverá passar por um processo de purificação com o objetivo de elevar seu poder calorífico com a retirada da água e do gás carbônico presentes na mistura. Além destes, pode estar presente na mistura gasosa o gás sulfídrico, que deverá ser removido uma vez que pode afetar tanto o rendimento quanto a vida útil do motor utilizado por ser um gás altamente corrosivo [24]. Outra vantagem é que após a purificação, o gás pode ser armazenado em torpedos de aço, a 200 atmosferas, para utilização em veículos, garantindo assim uma maior autonomia, além de apresentar um melhor rendimento quando usado em motogeradores [23]. As etapas do processo de purificação são apresentadas a seguir.

3.1.1 – Remoção de umidade

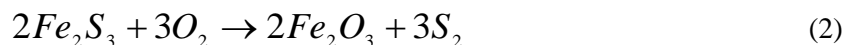
Dependendo de qual for o posterior uso do biogás será definido qual o grau de umidade aceitável, que pode ser associado ao ponto de orvalho, e assim será realizada a secagem do mesmo. Esse processo pode ser executado com a utilização de glicóis, com sílica gel ou outro produto que retenha umidade [10].

3.1.2 – Retirada de gás sulfídrico por óxido férrico

Consiste em passar a mistura gasosa por uma torre com preenchimento de óxido de ferro III (Fe_2O_3) e aparas de madeira. O gás é injetado pela base da torre e conforme vai caminhando pela mesma vai perdendo o gás sulfídrico (H_2S) que fica retido ao reagir com o óxido de ferro [10]. É talvez o processo mais barato e simples. A reação química deste processo é apresentada em (1):



Para regenerar o óxido de ferro, basta expor o enchimento ao ar (2):



Ao invés de ser utilizado óxido de ferro, o mesmo pode ser substituído por óxido de zinco (ZnO), mas este é mais caro.

Estima-se que $1,0 \text{ m}^3$ de enchimento com óxido de ferro possa ser capaz de remover cerca de 100 kg de enxofre [10].

Outro meio de retirar o gás sulfídrico é realizar a lavagem do gás em lixívia de hidróxido de potássio (KOH) e utilizar o sal resultante como aditivo do biofertilizante para enriquecê-lo com enxofre e potássio [11].

3.1.3 – Remoção de gás carbônico

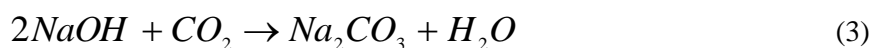
A remoção de gás carbônico pode ser efetuada de muitas maneiras. O gás pode ser lavado com água, sendo um processo simples de remover as impurezas, mas é um processo que consome uma quantidade elevada de água sem contar que é muito dependente da temperatura e pressão [11, 10]. No

entanto, como apresenta uma pressão parcial muito pequena, somente uma pequena quantidade é retirada nesse processo [10].

Quando se opera com elevadas pressões, grandes quantidades de gás carbônico são absorvidas pela água o que a torna muito ácida e conseqüentemente corrosiva, representando um problema no momento do descarte em algum corpo de água [10].

3.1.4 – Remoção de gás sulfídrico e gás carbônico por hidróxido de sódio (NaOH), potássio (KOH) ou cálcio [Ca(OH)₂]

Quando o gás carbônico entra em contato com a solução de algum dos hidróxidos de sódio, potássio ou cálcio ocorre a formação de bicarbonato, sendo esta reação irreversível – equações (3) e (4). Se houver tempo de reação suficiente, o gás sulfídrico também será removido – equação (5) [10]:



Entre os três, o hidróxido de cálcio é o mais barato, mas há um problema na sua utilização. Há a precipitação de carbonato de cálcio (CaCO₃) que pode provocar o entupimento das bombas e demais dispositivos, como encanamentos, o que pode trazer grandes transtornos [10].

Podem ainda ser utilizados outros dois processos para a remoção do gás carbônico e do gás sulfídrico. Um é utilizando solventes orgânicos, mas devido à corrosão, perda elevada por constituírem substâncias muito voláteis, elevado custo de energia e por periculosidade em geral este processo deve ser evitado. Outro processo é utilizando carbonato de potássio (K₂CO₃) a quente, mas como exige aquecimento e operação da solução em torno de 110 °C, demandando energia para esse aquecimento, também deve ser evitado objetivando-se assim a eficiência energética.

3.2 - Poder calorífico

Uma das características mais importantes de um combustível é que representa a quantidade de energia liberada na combustão completa de uma unidade de massa do mesmo (kJ/kg) é denominada poder calorífico, também conhecido como poder de queima, calor de combustão ou potência calorífica [25].

O poder calorífico pode ser medido a volume constante ou à pressão constante. Para efetuar a medida no primeiro caso é utilizada uma bomba calorimétrica, já para o segundo caso utiliza-se um calorímetro de gás, para gases [25].

Quando se determina a composição de um combustível, verifica-se que o mesmo é geralmente composto de carbono, hidrogênio e oxigênio. Quando da combustão do mesmo, há a formação de água como produto dessa reação devido à presença do hidrogênio. Essa água pode estar no estado líquido, gasoso ou ainda nas duas fases juntas. Caso a água formada na combustão se condense, obtêm-se um poder calorífico do combustível maior (poder calorífico superior), mas se a água estiver no estado gasoso o poder calorífico será menor (poder calorífico inferior) [25]. Devido a este fato o metano apresenta um poder calorífico superior (PCS) e um poder calorífico inferior (PCI) e, em consequência disso, o biogás (mistura de gás metano e gás carbônico, principalmente) apresentará um poder calorífico superior e outro inferior como pode ser observado na Tabela 2.

Tabela 2 – Propriedades físicas e químicas do metano

Peso molecular	16,04 u.m.a.
Ponto de ebulição, a 1,00 atm	-161,49 °C
Ponto de congelamento, a 1,00 atm	-182,48 °C
Pressão crítica	45,84 atm
Temperatura crítica	-82,50 °C
Peso específico (0°, 1,00 atm)	0,718 kg/m ³
Poder calorífico superior (0°, 1,00 atm)	9.520,00 kcal/m ³
Poder calorífico inferior (0°, 1,00 atm)	8.550,00 kcal/m ³
Relação ar/combustível	9,53 litros/1litro
Limites de inflamabilidade	5,00 a 15,00% em vol.
Numero de octanos	130,00
Temperatura de ignição	650,00 °C
Energia para ignição	300,00μJ
Velocidade de chama	0,40m/s

Fonte: Craveiro,1982 [10].

Em função da porcentagem de metano na composição da mistura gasosa (biogás), o poder calorífico deste pode variar de 5.000 a 7.000 kcal por metro cúbico. Uma vez eliminado todo o gás carbônico da mistura esse poder calorífico poderá chegar a aproximadamente 12.000 kcal por metro cúbico [12, 13, 15, 21].

Na Tabela 3 pode ser observado o poder calorífico de alguns combustíveis.

Tabela 3 – Poder calorífico de alguns combustíveis

Combustível	kcal
Madeira	4.500/kg
Briquetes de carvão	8.000/kg
Carvão vegetal	7.620/kg
Diesel	8.500/litro
Gasolina	7.700/litro
Querosene	8.800/litro
BPF (óleo combustível)	8.400/kg
BTE (óleo combustível)	10.400/kg
Álcool etílico 96° GL	5.100/litro ou 6.400/kg
Gasogênio	1.250/m ³
GLP (gás liquefeito de petróleo)	11.000/kg

Fonte: Gryschek e Belo, 1983 [9].

A Tabela 4 apresenta a comparação entre diferentes fontes energéticas e o biogás.

Tabela 4 – Comparação entre diferentes fontes energéticas e biogás

Biogás (m ³)	Fonte energética	Equivalências		
		Litro (l)	kg	kWh
1,63	Gasolina	1,00		
1,80	Óleo diesel	1,00		
1,73	Querosene	1,00		
1,58	Gasolina de avião	1,00		
2,00	Óleo combustível	1,00		
1,81	Petróleo médio	1,00		
1,26	Álcool combustível	1,00		
2,20	GLP		1,00	
0,65	Lenha		1,00	
1,36	Carvão vegetal		1,00	
0,29	Xisto		1,00	
0,70	Energia elétrica			1,00

Fonte: Filho, 1981 [20].

Segundo alguns autores, o biogás terá um poder calorífico inferior entre 4,95 e 7,92 kWh/m³, de acordo com a porcentagem de metano presente na mistura, de 50 e 80%, respectivamente [1, 11, 12, 13, 21]. O poder calorífico bruto do biogás pode ser considerado aproximadamente de 6 kWh/m³, sendo que para o gás purificado este valor sobe para 9,5 kWh/m³ [16].

Na Tabela 5 é apresentada a equivalência energética do biogás comparada a outras fontes de energia segundo alguns autores.

Tabela 5 – Equivalência energética do biogás (1 m³) comparada a outras fontes de energia

Energético	Ferraz e Mariel (1980)	Sganzeria (1983)	Nogueira (1986)	Barrera (2003)
Gasolina (l)	0,61	0,61	0,61	0,61
Querosene (l)	0,58	0,58	0,62	0,58
Diesel (l)	0,55	0,55	0,55	0,55
GLP (kg)	0,45	0,45	0,43	0,45
Álcool (l)	-	0,79	0,80	0,79
Carvão mineral (kg)	-	0,74	0,74	-
Lenha (kg)	-	1,52	3,50	1,54
Elettricidade (kWh)	1,43	1,43	-	1,43

Fonte: Ferraz e Mariel (1980) [26], Sganzeria (1983) [27], Nogueira (1986) [28], Barrera (2003) [15].

3.3 - Aplicações do biogás

O gás produzido pode ser usado diretamente, purificado e utilizado ou ainda purificado e armazenado para posterior utilização.

O transporte do gás pode ser feito de quatro maneiras:

- Em aplicações domésticas, para aquecimento e iluminação e na aplicação em grupo moto-gerador o gás é transportado por gasoduto;
- Sob pressão de 200 atmosferas em recipientes podendo ser empregado também no aquecimento e iluminação, na cocção de alimentos, como combustível automotivo ou outro tipo de aplicação;
- Criogenado a -160 °C, comumente utilizado no transporte marítimo do GLP (Gás Liquefeito de Petróleo);
- Adsorvido em carvão ativado.

As duas últimas opções de transporte, para o caso do gás produzido num biodigestor, mostram-se muito complexas e caras tornando a operação inviável ainda hoje, devendo o gás ser utilizado localmente.

Existem diversas tecnologias capazes de efetuar a conversão energética ou utilização do biogás. A energia química contida nas moléculas do biogás é convertida em energia mecânica através da combustão; essa energia mecânica é então convertida em energia elétrica com a utilização de um gerador. No entanto, o biogás também pode ser usado na produção de calor, o qual pode ser utilizado no aquecimento de, por exemplo, caldeiras para qualquer tipo de processo industrial que utilize ou necessite de água a altas temperaturas ou vapor d'água. Também deve ser citada a possível utilização do biogás nas células a combustível, embora elas não estejam comercialmente disponíveis atualmente.

Por isso, atualmente, as turbinas a gás e os motores de combustão interna, ciclo Otto, são as tecnologias mais utilizadas para o aproveitamento energético do biogás.

3.3.1 – Emprego do biogás na produção de vapor

Este é o caso de indústrias que tratam seus resíduos através do processo de digestão anaeróbia e utilizam o biogás gerado para geração de vapor nas caldeiras, economizando com isso óleo combustível, carvão mineral, carvão vegetal ou lenha, já que de acordo com a Tabela 5, cada metro cúbico de gás equivale a aproximadamente 0,60 litros de querosene, 0,55 litros de diesel, 0,74 kg de carvão mineral ou 1,6 kg de lenha.

A Tabela 6 apresenta o consumo de biogás em algumas aplicações.

Tabela 6 – Consumo de biogás por aplicação

Aplicação	Consumo
Motor a explosão	0,450 m ³ /HP/h
Iluminação	0,120 m ³ /camisa de 100,0 W/h
Cozimento de alimento	0,340 m ³ /pessoa/dia
Forno de assar alimento	0,420 m ³ /hora
Aquecedor de ambiente	0,227 m ³ /hora
Geladeira	1,3 m ³ /dia

Fonte: Alves, 1980 [22].

3.3.2 – Emprego do biogás para geração de energia elétrica

O biogás produzido nos biodigestores pode ser utilizado como fonte de energia primária para fornecer energia mecânica em turbinas e motores, os quais acoplados a geradores elétricos são capazes de produzir energia elétrica. Essa energia elétrica poderá ser utilizada localmente pela indústria ou ainda vendida para a concessionária de energia elétrica local, havendo excedente na geração, viabilidade e possibilidade de comercialização.

Um metro cúbico de biogás (1 m³ de biogás) é equivalente a 6,5 kWh de energia elétrica e a eficiência dos sistemas de cogeração varia entre 30 e 38%, ou seja, entre 1,95 e 2,47 kWh. Nota-se o potencial do mesmo para ser utilizado em sistemas de cogeração de energia [1, 29].

3.3.3 – Emprego do biogás como matéria-prima para a indústria

O metano pode ser utilizado como matéria-prima para a síntese de uma série de compostos orgânicos. Na atualidade deve ser destacada a sua utilização na obtenção de metanol.

No processo de transformação do metano em metanol aconselha-se a adição de gás carbônico no estágio de reforma, sendo que a composição ideal é de 77,4% de CH₄ e 22,6% de CO₂ [10].

Como a composição do biogás possui de 30 a 45% de gás carbônico o que deve ser feito é a retirada de parte desse gás por algum dos processos já descritos anteriormente, ajustando assim a concentração para 22,6%.

3.3.4 – Emprego do biogás como combustível veicular

Juntamente com a opção de geração de energia elétrica esta é uma das alternativas mais atraentes quando a produção do biogás é grande.

Como o custo para liquefazê-lo é alto, a tendência é utilizá-lo na forma gasosa a altas pressões.

Quando utilizado como combustível veicular é necessário realizar a purificação do biogás retirando-se tanto o gás carbônico quanto o gás sulfídrico. O gás sulfídrico deve ser retirado uma vez que o mesmo é corrosivo e isso pode trazer sérios problemas de corrosão interna ao motor. Já o gás carbônico deve ser retirado com o intuito de aumentar o poder calorífico do gás e assim manter nos tanques de armazenamento uma maior densidade de biogás com maior poder calorífico, o que valerá uma maior autonomia ao veículo.

4 – O Biofertilizante

Esta é a denominação comumente usada para designar o resíduo aquoso de natureza orgânica, que pode ser utilizado na fertilização do solo, que tem origem na fermentação de restos de vegetais e animais em biodigestores com a finalidade de se obter gás metano [23].

Pelo processo de fermentação, o material orgânico utilizado para produzir o biogás transforma-se em fertilizante orgânico. Este material é isento de agentes causadores de doenças e pragas às plantas, não apresenta odor e por isso não atrai moscas, insetos e roedores, agentes proliferadores e causadores de doenças. Caso isso ocorra, é necessário aumentar o tempo de detenção hidráulica do material [13, 20, 23].

O biofertilizante contribui para o restabelecimento do teor de húmus do solo, melhorando as propriedades físicas e químicas além de ajudar na melhoria da atividade microbiana do solo, podendo ser aplicado diretamente na forma líquida ou desidratada, dependendo das condições locais de infra-estrutura e necessidades [20].

O biofertilizante apresenta maior concentração de nutrientes do que o resíduo original devido à perda significativa de carbono, hidrogênio e oxigênio [23]. A composição média do biofertilizante é de 1,5 a 4,0% de nitrogênio, 1,0 a 5,0% de fósforo e 0,5 a 3,0% de potássio, além de apresentar vários micronutrientes como cálcio, magnésio, enxofre, boro, cobre, ferro, manganês, molibdênio e zinco, o que lhe garante inegáveis vantagens para utilização como complemento ou substituto dos adubos nitrogenados químicos [13, 20, 23]. Além disso, apresenta pH na faixa de 7,0 a 8,0, geralmente em torno de 7,5, levemente alcalino, propiciando o crescimento de microorganismos úteis à terra que restabelecem a vida do solo, levando ao equilíbrio do pH [15, 23]. Caso o afluente apresente pH menor do que 7,0, afluente ácido, deve-se avaliar o processo, uma vez que isso indica ou digestão incompleta ou sobrecarga do biodigestor. Já, se o afluente apresentar pH maior do que 8,0, afluente alcalino, deve-se avaliar a operação do biodigestor, uma vez que isso indica tempo de detenção hidráulica muito alto [23].

No início do processo de biodigestão, o resíduo geralmente apresenta relação C/N (quociente da quantidade de carbono pela de nitrogênio) superior a 30, mas depois de estabilizado adequadamente esta relação passa a ser aproximadamente de 10 ou 12, tornando-o mais seguro para aplicação no solo [23].

O biofertilizante pode ser aplicado em qualquer tipo de cultura, anual ou perene, gramínea ou leguminosa, frutífera ou olerícola. Nas culturas anuais o ele deve ser aplicado no sulco de plantio, enquanto que nas culturas perenes, como café e citros, deve ser distribuído ao redor da planta sob a copa da mesma [23].

A complementação da adubação com biofertilizante em lavouras de café sinaliza para a redução da sazonalidade na produção da planta. Na produção de milho a produção por hectare (ha) é duplicada em

comparação a lavouras que usam os métodos tradicionais de adubação [30], demonstrando a vantagem de utilização da adubação com o biofertilizante.

A aplicação e dosagem da aplicação quase sempre são limitadas pela quantidade disponível do biofertilizante, mas variam de 50 a 100 t/ha do produto no estado natural e de 1 a 2 t/ha do produto seco, e pode ser duplicada ou triplicada caso haja quantidade suficiente para isso [23].

5 – Microbiologia e Bioquímica na Produção do Biogás

De acordo com a tecnologia de fabricação das indústrias alimentícias, os efluentes industriais apresentam grande diversidade em relação às suas características físicas, químicas e microbiológicas de acordo com o produto e a tecnologia de fabricação, devendo assim, cada indústria projetar seu próprio sistema de tratamento de acordo com as características de seu efluente. Contudo, deve-se ressaltar que as operações unitárias de uma estação de tratamento de efluentes não variam, sendo as mesmas baseadas em processos físicos, químicos e biológicos. O processo biológico envolve a participação de microorganismos presentes no sistema que promoverão a redução da matéria orgânica em biomassa e biogás [7].

A maioria dos compostos pode ser degradada pela via anaeróbia, sendo que o processo apresenta-se mais eficiente e econômico quando os dejetos são facilmente biodegradáveis. A digestão anaeróbia, assim como os digestores anaeróbios têm sido aplicados para o tratamento de resíduos sólidos tais como culturas agrícolas, dejetos de animais, lodos de Estação de Tratamento de Esgoto (ETE), lixo urbano e dejetos industriais em países desenvolvidos e em desenvolvimento [7].

No Brasil, cada estado tem suas leis de controle ambiental, sendo que no estado de São Paulo quem regula as emissões industriais é a Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental (CETESB).

As águas situadas no território do estado foram divididas em classes segundo seus usos preponderantes, sendo que a cada classe de água corresponde um grau de pureza de acordo com o nível de tratamento prévio requerido para o abastecimento doméstico. Essa divisão permite estabelecer qual tipo de resíduo pode ser despejado em cada classe de água [31].

Se o estabelecimento industrial é servido por sistema público de esgoto, os efluentes devem ser lançados nesse sistema mediante tratamento prévio e adequado, respeitando parâmetros estabelecidos em lei (Artigo 19 a., do Decreto nº 8.468/76). Caso o estabelecimento não seja servido por rede pública de esgoto, a legislação estabelece parâmetros máximos variáveis para cada tipo de resíduo industrial potencialmente prejudicial à qualidade das águas, segundo a classe de água a que pertence às águas que vão receber tal despejo (Artigo 11 e subsequentes do Decreto Nº 8.468/76) [32].

Portanto, os resíduos industriais, independentes da sua composição, devem atender às normas estabelecidas pelo Decreto Nº 8.468/76, de 8 de setembro de 1976, que dispõe sobre a Prevenção e o Controle da Poluição do Meio Ambiente, publicada no Diário Oficial da União (DOU) no dia 9 de setembro de 1976 [32].

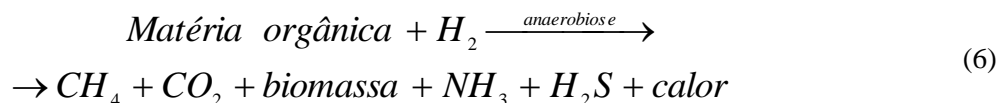
As atividades de abatedouros apresentam águas residuárias com alta concentração de sangue, gordura, excremento, substâncias contidas no trato digestivo dos animais, entre outros, o que caracteriza um efluente com alta concentração de matéria orgânica. Esses resíduos, quando não tratados adequadamente, representam um grave problema ambiental uma vez que podem tornar-se focos de

proliferação de insetos e de agentes infecciosos, podem produzir odores desagradáveis e quando lançados diretamente em rios e lagos, devido à alta concentração de resíduos orgânicos, caracterizam uma grave poluição dos corpos d'água, uma vez que o oxigênio livre da água acaba sendo utilizado na degradação da matéria orgânica, caracterizando o processo de eutrofização do corpo d'água, levando à morte, por asfixia, peixes e outros organismos aquáticos [7].

O tratamento de efluentes de abatedouros por biodigestão anaeróbia é uma opção viável. Isso se deve ao fato das altas taxas de remoção da matéria orgânica do efluente além da estabilização do mesmo. Além disso, o efluente do processo pode ser utilizado como biofertilizante e o gás produzido pode ser utilizado na geração de energia. Somado a isso tudo, tem-se o fato de que a queima de metano gera menor quantidade de poluentes atmosféricos o que contribui para a mitigação do efeito estufa [7].

5.1 – Digestão anaeróbia

O processo de digestão anaeróbia envolve a degradação e estabilização da matéria orgânica levando à formação de metano, produtos inorgânicos (dióxido de carbono) e biofertilizante (matéria orgânica estabilizada). A representação da digestão anaeróbia pode ser feita pela equação (6) [33]:



As principais finalidades da digestão anaeróbia são a remoção da carga orgânica poluente, redução dos microorganismos patogênicos, produção de biogás e produção de biofertilizante mais estável, mais rico em nutrientes assimiláveis e com melhor qualidade sanitária quando comparado ao rejeito industrial original [33, 34].

A digestão anaeróbia é uma fermentação simples que ocorre em um único tanque, como uma fossa ou lagoa anaeróbia.

A degradação anaeróbia da matéria orgânica a metano é um processo biológico que ocorre em diferentes fases, sendo processado por diferentes tipos de microorganismos que agem simbioticamente [35]. Isso torna necessária a representação do processo anaeróbio incluindo outras populações de bactérias intermediárias. Essas bactérias ou microorganismos são os hidrolíticos, acidogênicos, acetogênicos e metanogênicos [36, 37].

As bactérias acidogênicas e as arqueas metanogênicas apresentam características diferentes, principalmente em relação às exigências nutricionais, a fisiologia, o pH, o crescimento e a sensibilidade quanto a variações de temperatura [38]. Em relação à velocidade de reprodução, quando comparadas às

bactérias acidogênicas, as arqueas metanogênicas apresentam menor velocidade além de serem mais sensíveis às condições adversas ou alterações das condições ambientes [34].

5.1.1 – Bactérias hidrolíticas fermentativas

Essas bactérias são responsáveis pela solubilização da matéria orgânica, e isso ocorre com a quebra dos polímeros transformando-os em compostos menores, monômeros simples [19, 20, 39].

Com a quebra das cadeias, as proteínas dão origem aos aminoácidos, os carboidratos complexos formam monômeros de açúcar e as gorduras, os ácidos graxos de cadeia longa. A velocidade dessas reações depende da superfície de contato entre o substrato e as enzimas liberadas pelas bactérias que as catalisam, podendo ser citadas a amilase, celulase, protease e lipase [19, 39].

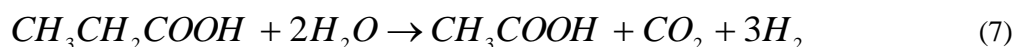
Em reatores anaeróbios podem ser encontrados os organismos *Clostridium* sp., *Peptococcus anaerobus*, *Bifidobacterium* sp., *Desulphovibrio* sp., *Corynebacterium* sp., *Lactobacillus*, *Actinomyces*, *Staphylococcus*, e *Escherichia coli*, que são bactérias anaeróbias facultativas ou obrigatórias, responsáveis pela hidrólise e fermentação [39].

Após a hidrólise, as bactérias atuam na fermentação dos produtos obtidos, havendo a formação de compostos orgânicos de moléculas menores, como o ácido fórmico, acético, propiônico, butírico, valérico, láctico, etanol, amônia e gás carbônico e hidrogênio [19, 34, 40, 41].

Esta fase é limitante da velocidade do processo global quando o resíduo é predominantemente constituído de matéria orgânica não dissolvida como proteínas, gorduras e celulose.

5.1.2 – Bactérias acetogênicas produtoras de hidrogênio

Nessa fase há a produção de acetato e hidrogênio através do metabolismo das substâncias produzidas pelas bactérias hidrolíticas fermentativas, equações (7) e (8). Nessa etapa, alguns produtos da fase anterior como o etanol, propionato, butirato, valerato e lactato, em baixa pressão do gás hidrogênio, são oxidados a acetato, havendo a formação de dióxido de carbono e hidrogênio [19, 39]. Os produtos gerados pelas bactérias acetogênicas são apropriados para as arqueas metanogênicas [39].



5.1.3 – Bactérias homoacetogênicas

Essas bactérias produzem acetato a partir de dióxido de carbono, sendo um processo contrário ao das bactérias acetogênicas, e são consumidoras de hidrogênio [19].

5.1.4 – Árqueas metanogênicas

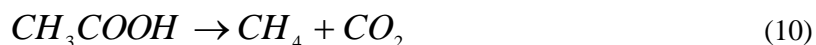
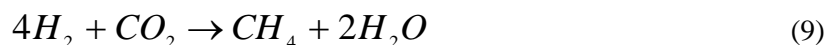
São microorganismos que atuam sobre o dióxido de carbono, hidrogênio e acetato, transformando-os em metano [20, 39].

De acordo com o substrato que utilizam como fonte de energia, as árqueas metanogênicas são divididas em dois subgrupos, as hidrogenotróficas e as acetoclásticas.

As hidrogenotróficas utilizam o hidrogênio (doador de elétrons) e o carbono proveniente do gás carbônico (acceptor de elétrons) para formarem o gás metano, equação (9) [19, 39]. Já as acetoclásticas utilizam o acetato para a produção de metano, equação (10) [19, 39].

Dentre todas as fases, a metanogênica é a mais sensível à variação dos fatores que influenciam a digestão anaeróbia, dentre os quais se podem destacar a quantidade de matéria seca (MS), a concentração de nutrientes, o pH, a temperatura interna do digestor, o tempo de detenção hidráulica (TDH), a concentração de sólidos voláteis (SV), a presença de substâncias tóxicas e a relação carbono/nitrogênio [20].

As principais reações de formação do metano são descritas a seguir [40]:



A reação expressa pela equação (10) é responsável pela produção de aproximadamente 70% do metano produzido durante o processo de digestão anaeróbia, em que o grupo metil é reduzido a metano e o grupo carboxílico é oxidado a gás carbônico [42].

5.1.5 – Bactérias sulfetogênicas

Como o dejetos do abatedouro (sangue e partes descartadas) apresenta alta concentração de enxofre pode ocorrer o aparecimento das bactérias sulfetogênicas durante o processo de digestão. Essas bactérias

competem com as metanogênicas pelo mesmo substrato, mas produzem como subproduto o gás sulfídrico [39]. Então, deve-se tomar cuidado durante a operação do biodigestor quanto ao possível aparecimento de tais bactérias, pois a concentração de metano na mistura gasosa diminuirá drasticamente comprometendo o rendimento da geração de energia elétrica através da queima do gás, além do que a alta concentração do gás sulfídrico provocará o desgaste precoce dos equipamentos, principalmente dos geradores.

5.2 – Fatores que influenciam na digestão anaeróbia

O processo de digestão anaeróbia pode ser seriamente afetado por fatores que estão relacionados com o substrato, com as características do digestor ou com as condições de operação. Maiores detalhes sobre esses fatores são apresentados a seguir.

5.2.1 – Quantidade de matéria seca (MS)

Para que a produção de metano ocorra de forma satisfatória é necessário que a concentração de matéria seca seja de 7 a 9%, isto é, a cada 100,0 litros de biomassa deve haver uma média de 8,0 kg de MS, para digestores contínuos [12, 20]. Já, para digestor tipo batelada a concentração de matéria seca pode chegar a 25,0% de MS, ou seja, 25,0 kg de MS para cada 100,0 litros de biomassa [12].

Digestor contínuo recebe carga de efluente continuamente, ou periodicamente, sem que ocorra a paralisação do processo de biodigestão e produção de biogás, havendo também produção contínua de afluente.

Já, em digestor tipo batelada uma nova carga de efluente só é realizada quando o processo de biodigestão chega ao fim (mínima produção de biogás), e para que isso ocorra é preciso que a câmara de digestão seja esgotada.

5.2.2 – Concentração de nutrientes

A presença de alguns macronutrientes como o carbono, nitrogênio, potássio, fósforo e enxofre, alguns micronutrientes minerais, vitaminas e aminoácidos são indispensáveis para o desenvolvimento das arqueas metanogênicas, sendo assim, o conhecimento da composição química e o tipo de biomassa utilizada são importantes. Se for necessário, pode ser feita a dosagem de nutrientes e ativadores químicos para que ocorra uma boa fermentação da biomassa [20].

5.2.3 – pH – Acidez ou Alcalinidade

O pH é um índice da acidez ou alcalinidade da mistura no interior do biodigestor e que pode ser medido com a utilização de pH-metro [12].

Em digestores, a faixa de operação está entre pH 6,0 a 8,0, sendo que o ponto ideal encontra-se em pH 7,0 [12, 13, 19, 20]. Valores abaixo dessa faixa determinam a queda de produção do biogás, podendo chegar à paralisação quando o pH atinge valores inferiores a 6,0 [12, 13].

Segundo Vitoratto [19], para a conversão de proteínas a aminoácidos, a faixa de operação ótima do biodigestor se encontra entre pH 7,0 e 7,5, ao passo que para a conversão de aminoácidos a ácidos o valor ótimo do pH é de aproximadamente 6,3.

Para bactérias acidogênicas o pH ótimo se encontra na faixa de 5,5 a 6,0 enquanto que para arqueas metanogênicas a faixa de pH ótimo se encontra entre 6,8 a 7,2. Caso a taxa de hidrólise seja mais alta que a taxa metanogênica e a alcalinidade não seja suficientemente elevada, pode ocorrer o acúmulo de ácidos graxos voláteis (AGV) e de hidrogênio, levando à acidificação do reator, o que conduzirá à parada do processo [34, 39, 43].

No tratamento de resíduos de abatedouros, a alcalinidade é gerada, principalmente, pela mineralização das proteínas em amônia, que posteriormente se associará ao ácido carbônico formando bicarbonato de amônia como solução tampão [44].

Durante o funcionamento de um biodigestor pode haver a necessidade de correção tanto da acidez quanto da alcalinidade do meio. Para maior alcalinidade recomenda-se a utilização de cal, carbonato de sódio (Na_2CO_3), soda cáustica (NaOH), bicarbonato de sódio (NaHCO_3) ou bicarbonato de potássio (KHCO_3). Para maior acidez recomenda-se o emprego de ácido acético (CH_3COOH), acetato de sódio (CH_3COONa), ácido carbônico (H_2CO_3), amoníaco (NH_3) ou cloreto de amônio (NH_4Cl).

5.2.4 – Temperatura interna do biodigestor

O processo de fermentação é influenciado diretamente pela temperatura, agilizando-o e, conseqüentemente, diminuindo o tempo de retenção da massa no interior do biodigestor além do que a porcentagem de metano na constituição do biogás é maior quando o processo de fermentação ocorre em temperaturas mais elevadas, garantindo dessa forma um maior poder calorífico à mistura. Assim, com o funcionamento na faixa de temperatura adequada, o biodigestor poderá ter seu volume diminuído pela metade ou menos para o mesmo volume de gás produzido, representando economia de material na

construção, ou caso seja desejável, apresentar uma maior produção de gás com um volume pré-estabelecido [23].

Em um processo anaeróbio, o mais importante é manter uma temperatura constante dentro do reator, devido, principalmente, ao fato de que as arqueas metanogênicas são mais sensíveis a variações bruscas de temperatura [15, 34], apesar da formação de metano poder ocorrer em condições extremas, como 0 a 97 °C [38].

As arqueas metanogênicas podem ser divididas em dois grupos, as mesofílicas, que operam em temperaturas situadas na faixa de 20 a 40 °C, e as termofílicas, que operam na faixa de 50 a 60 °C [19, 34, 38]. Quando a temperatura de operação está em torno de 35 e 37°C o processo de digestão e gaseificação é altamente acelerado [12, 13, 15, 34, 38]. Para temperaturas inferiores a 35 °C o processo de digestão é menor e, para temperaturas inferiores a 15 °C, a produção é muito reduzida, podendo ser cessada [12, 15].

Estudando o efeito da temperatura no tratamento de resíduos de abatedouros em reatores seqüenciais de batelada, Massé e Masse [44] observaram um aumento na concentração de metano no biogás produzido, sendo que a 20°C a concentração de metano era de 74,7% e a 30°C a concentração do gás subiu para 78,2%.

Como se sabe, ao trabalharem na biodigestão, as bactérias também produzem o calor necessário para a sua manutenção então, o interessante é apenas impedir que variações climáticas externas bruscas interfiram na temperatura interior [15]. Portanto, pelo fato das arqueas metanogênicas serem sensíveis a variações de temperatura e, procurando manter a temperatura a mais próxima possível de 35 °C, garantindo assim um processo de digestão e gaseificação aceleradas com alto teor na concentração de metano, é uma boa prática construir o digestor em sua totalidade ou maior parte enterrada no solo.

5.2.5 – Tempo de detenção hidráulica (TDH)

Tempo de detenção hidráulica ou período de detenção hidráulica é o tempo que o material permanece no interior do biodigestor, ou seja, tempo entre a entrada do efluente e a saída do afluente do digestor. De acordo com os diferentes substratos (biomassa) utilizados para a alimentação do biodigestor, e dos demais fatores, o tempo de retenção varia de 4 a 60 dias [12, 20].

Para o substrato composto de resíduos de abatedouro o tempo de detenção situa na faixa de 20 a 30 dias, sendo que com 30 dias a carga orgânica já sofreu grande redução e devido a isso, a produção de biogás já atingiu seu máximo e a partir desse ponto passa a decair [7].

5.2.6 – Concentração de sólidos voláteis (SV)

Os sólidos voláteis são fermentados para produzir o biogás, daí a importância e necessidade de saber qual a concentração dos mesmos, se possível. Quanto maior a concentração de sólidos voláteis na biomassa, maior será a produção de gás, lembrando que isso também dependerá da eficiência do sistema digestor [20].

5.2.7 – Presença de substâncias tóxicas

Deve-se tomar cuidado com o material que entra no digestor para que o mesmo não possua nutrientes em excesso, desinfetantes fortes, bactericidas, combustíveis derivados de petróleo entre outros elementos que possam contaminar o substrato e ser fatal para as bactérias envolvidas no processo biológico de formação do gás [13, 15, 20]. Por esse fato, em abatedouros ou frigoríficos, a água de lavagem de utensílios, de dependências (linha de produção, cozinha e refeitório, banheiros e vestiários) e de lavagem de caminhões não deve ser introduzida no digestor, pois contém elevada carga de detergentes, desinfetantes e derivados de petróleo.

5.2.8 – Relação carbono/nitrogênio

É outro parâmetro que está diretamente relacionado ao desenvolvimento do processo biológico da fermentação. Para uma digestão ótima, é necessário que esta relação se situe entre 20 a 30:1, ou seja, de 20 a 30 partes de carbono para uma parte de nitrogênio [20].

6 – Biodigestor

O biodigestor, ou simplesmente digestor, pode ser definido como sendo uma câmara de fermentação ou tanque de fermentação, geralmente circular, construído abaixo do nível do solo com o intuito de tentar minimizar as variações de temperatura que podem em certos casos levar à interrupção do processo fermentativo e conseqüentemente à parada na produção de gás.

Os modelos de biodigestores mais empregados hoje no Brasil e no mundo foram desenvolvidos e aperfeiçoados na China e na Índia. Destaca-se que na China comunista, com mais de um bilhão de habitantes, existe o desafio permanente de produzir alimentos em larga escala, e na Índia, extremamente pobre e faminta, é carente não somente de alimentos, mas também de energia [15].

Para a China, país continental e com excesso populacional, a instalação de biodigestores transformou-se em uma questão estratégica durante as décadas de 50 e 60, no auge da Guerra Fria. O pensamento dos governantes seguia um raciocínio simples e lógico. No caso de uma guerra mundial, que poderia significar a destruição quase que por completa da civilização que conhecemos hoje, os ataques às centrais elétricas representariam o fim de toda a atividade econômica do país. Isso porque a energia deixaria de ser fornecida aos pequenos centros das regiões agrícolas que conseguiriam passar sem sofrer danos ao poder bélico do inimigo. Portanto, a descentralização implicava em tornar auto-suficientes as pequenas vilas, vilarejos e comunidades agrícolas do interior [15]. Apesar das razões estratégicas de guerra, o modelo chinês de biodigestor vem contemplando as chamadas tecnologias socialmente apropriadas, por uma razão simples e prática. Com uma grande população que representa milhões de bocas para alimentar, ao mesmo tempo em que representam uma grande massa de mão de obra, a mecanização em ampla escala da atividade agrícola com a utilização de tratores e implementos agrícolas deixaria uma enorme quantidade de desempregados famintos, daí o interesse pelo desenvolvimento dos biodigestores, representando o aproveitamento e aperfeiçoamento de tecnologias rudimentares. [15].

Já no caso da Índia, a motivação da instalação de biodigestores foi a miséria e a ausência da auto-suficiência em petróleo que levaram os indianos a utilizar sistematicamente o conhecimento e sabedoria de sua casta privilegiada para minimizar o sofrimento das imensas populações marginais, castigadas pela fome e pela falta dos mais básicos produtos da civilização. O biogás seria utilizado como substituto energético do petróleo enquanto que os dejetos ou afluentes do biodigestor seriam utilizados como adubo na agricultura [15].

Nesse contexto, existem hoje na China mais de oito milhões de biodigestores em funcionamento, 300 mil biodigestores em funcionamento na Índia e no Brasil, segundo estimativas da Embrapa no início dos anos 90, eles não chegavam a oito mil em funcionamento [15].

Então, ao se discutir essas duas tecnologias, biodigestor modelo indiano e modelo chinês, dois fatores devem ser levados em conta. A China é exportadora de petróleo, sendo o seu principal objetivo a produção de alimentos, logo o modelo de biodigestor desenvolvido prima pela produção de biofertilizante e por isso é mais simples e econômico. Já na Índia o principal problema é energético, resultando em um modelo de biodigestor capaz de aproveitar com maior eficiência o biogás produzido, por isso é um modelo mais sofisticado e técnico [15].

Nos dois modelos a produção de biofertilizante é a mesma e para as condições climáticas brasileiras, a menor capacidade de produção de biogás do modelo chinês é insignificante, sendo que a única diferença está no fato que o modelo indiano apresenta melhor sistema contra a fuga de gás, o que aumenta a chance de utilização do gás na geração de energia.

As diferenças entre o modelo indiano e chinês de biodigestores não são expressivas, sendo que o maior diferencial está relacionado com a cúpula. No modelo chinês a cúpula é fixa e de alvenaria, já no modelo indiano a cúpula é móvel e pode ser feita de metal, fibra de vidro, plástico resistente a corrosão ou qualquer outro tipo de material [15].

6.1 - Quanto ao fornecimento de gás

Quanto ao fornecimento de biogás, podemos classificá-los em contínuos e descontínuos.

6.1.1 – Biodigestor contínuo

São os biodigestores que quando corretamente operados fornecem gás permanentemente. Nessa categoria situam-se os biodigestores modelo indiano, modelo chinês e o modelo da Marinha Brasileira.

6.1.1.1 – Biodigestor tipo Indiano

O biodigestor tipo indiano deve ser utilizado quando se necessita de um fornecimento contínuo de biogás.

Consiste de uma câmara de digestão, construída em geral abaixo do nível do solo, tendo em sua parte superior o acoplamento de uma campânula móvel de material impermeável e rígido que serve de tanque do biogás (gasômetro).

O gasômetro pode ser construído em chapas de ferro ou em fibra de vidro. A vantagem de construir o gasômetro em fibra de vidro é que este material não sofre a ação de agentes corrosivos como o

gás sulfídrico presente na mistura gasosa. Caso o mesmo seja construído em fibra de vidro devem-se adicionar pesos sobre o mesmo a fim de aumentar a pressão do biogás.

A pressão de operação do modelo indiano é constante uma vez que, à medida que o volume de biogás produzido não é consumido, o gasômetro se desloca verticalmente para cima, aumentando, assim, o volume da câmara de armazenamento de gás, portanto, mantendo a pressão, no interior desta, constante. Como o gasômetro é disposto sobre o substrato ou sobre um selo de água, as perdas na produção de biogás, durante o processo anaeróbio, são reduzidas [15, 21].

A câmara de digestão pode ser construída em alvenaria, concreto ou aço, abaixo do nível do solo ou ao nível do solo. Neste caso o processo de digestão é afetado mais facilmente por variações de temperatura. Do mesmo modo que o gasômetro, se a câmara de digestão for construída em aço devem-se tomar alguns cuidados para evitar o ataque por substâncias corrosivas.

Nas figuras 1 e 2 são apresentadas as representações de um biodigestor tipo Indiano.

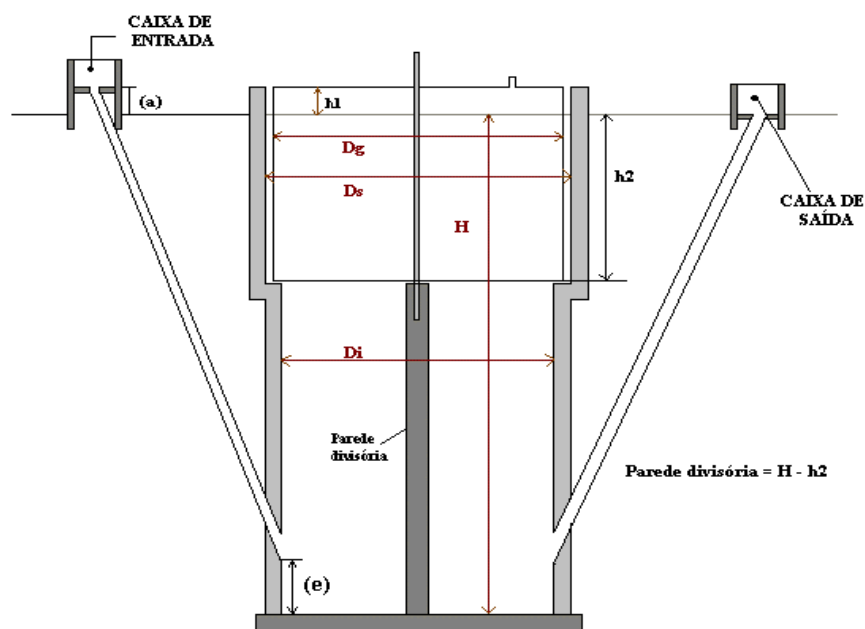


Figura 1 – Biodigestor tipo Indiano [21].

Sendo:

- **H:** altura do nível do substrato;
- **Di:** diâmetro interno do biodigestor;
- **Dg:** diâmetro do gasômetro;
- **Ds:** diâmetro interno da parede superior;
- **h1:** altura ociosa (reservatório do biogás);
- **h2:** altura útil do gasômetro;

- **a:** altura da caixa de entrada;
- **e:** altura de entrada do cano com o afluente.



Figura 2 – Representação tridimensional em corte do biodigestor tipo Indiano [21].

No tipo de biodigestor indiano a alimentação deve ser diária. O resíduo que alimenta o biodigestor tipo indiano deve apresentar no máximo uma concentração de 8% em volume de sólidos totais (ST). Isso se deve ao fato de facilitar a circulação do resíduo pela câmara de fermentação bem como evitar o entupimento dos canos de carga dos afluentes e descarga dos efluentes [21].

6.1.1.2 – Biodigestor tipo Chinês

Este tipo de biodigestor não apresenta partes móveis (gasômetro) como o tipo Indiano, sendo constituído de uma única câmara formada por uma única peça. Por esta razão, é construído abaixo do nível do solo e pode ser construído em alvenaria ou concreto.

Por ser construído em alvenaria ou concreto e sempre trabalhar a elevadas pressões, alguns cuidados durante a execução da obra devem ser tomados para evitar o aparecimento de trincas e com isso evitar o escape de gás.

Esse tipo de biodigestor funciona com base no princípio de prensa hidráulica. Com o aumento da produção de biogás há o aumento da pressão interior da câmara, que força o deslocamento do resíduo

interno da câmara de fermentação para a caixa de saída, e em sentido contrário quando ocorre o abaixamento da pressão [21].

Opta-se pela utilização de biodigestores tipo chinês em instalações de pequeno e médio porte, onde a produção de biogás é alta. Isso se deve ao fato de que uma parcela do gás formado é liberada para a atmosfera com a intenção de reduzir parcialmente a pressão interna do gás [21].

Como no caso do modelo Indiano, o modelo Chinês necessita de um fornecimento diário de substrato, com concentração máxima de 8% em volume de sólidos totais para assim evitar o entupimento dos canos de entrada de efluentes e saída de afluentes bem como facilitar a circulação do resíduo no interior da câmara de fermentação [21].

Em determinados experimentos, o biodigestor tipo Indiano se apresentou mais eficiente quanto à produção de biogás e à redução de sólidos totais no substrato em relação ao biodigestor tipo Chinês. Mas, essa diferença se mostrou tão pequena que se pode afirmar, em termos comparativos, que os dois modelos, Chinês e Indiano, apresentam desempenho semelhante [45].

Nas Figuras 3 e 4 são apresentadas as representações de um biodigestor tipo Chinês.

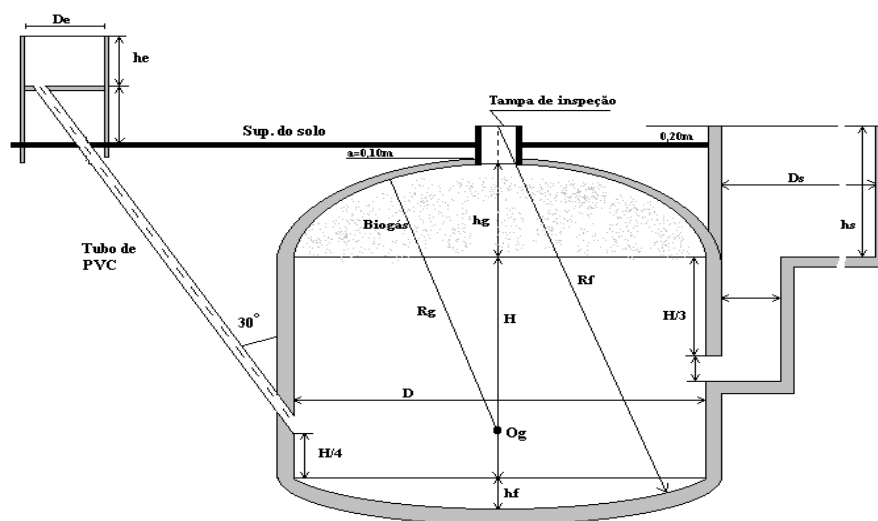


Figura 3 – Biodigestor tipo Chinês [21].

Sendo:

- **D:** diâmetro do corpo cilíndrico;
- **H:** altura do corpo cilíndrico;
- **hg:** altura da calota do gasômetro;
- **hf:** altura da calota do fundo;
- **Of:** centro da calota esférica do fundo;
- **Rf:** raio da calota esférica do fundo;

- **Og:** centro da calota esférica do gasômetro;
- **Rg:** raio da calota esférica do gasômetro;
- **he:** altura da caixa de entrada;
- **De:** diâmetro da caixa de entrada;
- **hs:** altura da caixa de saída;
- **Ds** é o diâmetro da caixa de saída.

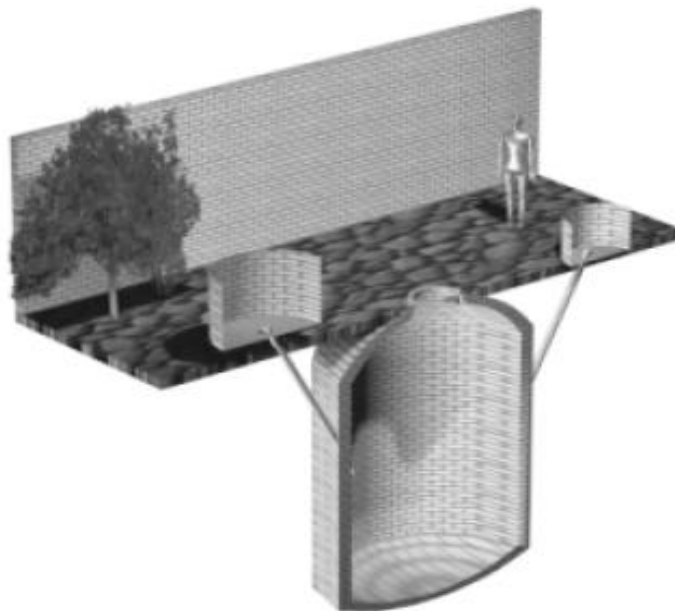


Figura 4 – Representação tridimensional em corte do biodigestor tipo Chinês [21].

6.1.1.3 – Biodigestor modelo Marinha Brasileira

Na década de 70, o Instituto de Pesquisa da Marinha do Brasil (IPqM) realizou estudos sobre biodigestores e acabou criando alguns modelos: Marinha I, com $5,5 \text{ m}^3$ de capacidade para resíduo e produção de $1,8$ a $3,0 \text{ m}^3$ de biogás ao dia, Marinha II, com 22 m^3 de capacidade para resíduo e produção de 6 a 10 m^3 de biogás ao dia, Marinha III, com 65 m^3 de capacidade para resíduo e produção de 15 a 30 m^3 de biogás ao dia, além de mais alguns modelos especiais [23].

O biodigestor desenvolvido pela Marinha do Brasil apresenta uma base quadrangular, com paredes de alvenaria revestidas por lona impermeável e uma cúpula de lona preta também impermeável. É um modelo mais raso e longo, o que lhe garante uma maior produtividade de gás por massa fermentada [15, 23]. Sua utilização encontra maior barreira no que diz respeito ao espaço físico disponível para a

instalação. Por ter uma profundidade pequena, necessita de uma grande área superficial para que consiga armazenar uma grande quantidade de resíduo.

Esse modelo é o mais indicado para projetos industriais e agroindustriais por ser versátil ao uso de diferentes resíduos orgânicos e ser capaz de armazenar grande quantidade de resíduo passível de sofrer fermentação anaeróbia, produzindo assim grande quantidade de biogás e estabilizando os dejetos que podem ser utilizados como biofertilizante [46].

Atualmente, esse modelo de biodigestor é mais difundido no Brasil devido ao aperfeiçoamento da manta impermeável que passou a ser confeccionada em Policloreto de Vinila (PVC), o que confere um menor custo e maior facilidade de instalação quando comparado com os modelos antigos (modelo Indiano e Chinês), além de apresentar maior resistência à corrosão provocada pela água e pelo ácido sulfídrico presentes na mistura gasosa. Outra vantagem é que o mesmo pode ser utilizado tanto em pequenos como em grandes projetos agroindustriais [47].

Em comparação ao modelo Indiano, o modelo da Marinha apresenta a vantagem de poder receber grande quantidade de resíduos. Em comparação com o modelo Chinês, a vantagem está no fato de aquele sofrer rachaduras na sua estrutura devido à composição do solo brasileiro que sofre muita acomodação, o que muitas vezes provoca perda de gás e exige monitoramento e manutenção constantes.

Na Figura 5 é apresentada a representação em corte de um biodigestor modelo Marinha.

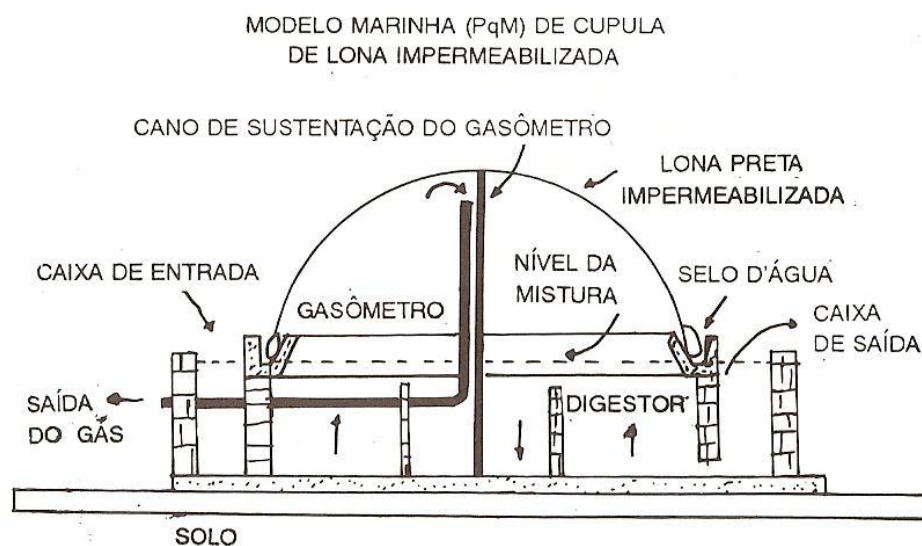


Figura 5 – Representação em corte de um biodigestor modelo Marinha [15].

Outra variação do modelo Marinha é somente a construção de um reservatório sem paredes divisórias, simplificando sua construção, como pode ser observado na Figura 6 [46].

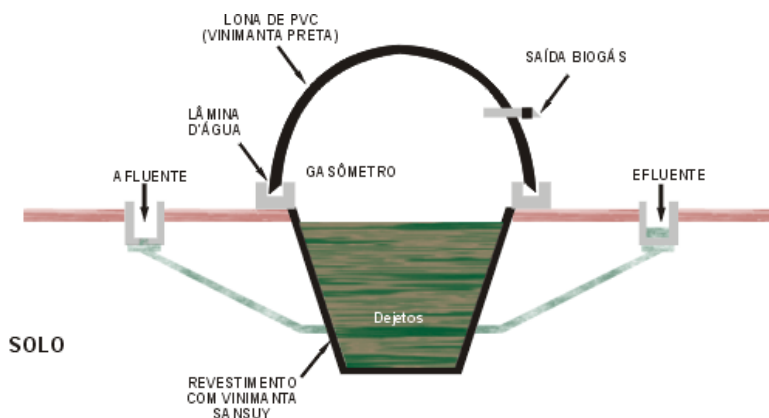


Figura 6 – Representação de biodigestor modelo Marinha sem paredes divisórias internas [48].

Depois de feita a construção do reservatório em alvenaria, o mesmo é impermeabilizado utilizando-se uma manta de vinil preta (vinimanta) de espessura de 0,8 mm, sendo o depósito de biogás também coberto por uma manta de vinil preta (vinimanta) de espessura 1,0 mm [46].

Para este modelo também é recomendada a construção abaixo do nível do solo para evitar bruscas variações de temperatura que possam ocorrer, além de aproveitar o calor da terra e o calor gerado pela manta preta exposta ao sol (90% do aquecimento do biodigestor é obtido com raios solares incidentes na lona preta) que acaba garantindo uma melhor temperatura de funcionamento e conseqüentemente uma maior produção de biogás com maior concentração de metano [46, 48].

Devido à utilização da manta como gásômetro, que confere baixa pressão à mistura gasosa, a distância máxima do ponto de consumo não deve ser superior a 50 metros sendo que se for necessária uma maior pressão é recomendado o uso de compressor [46, 47].

Na Figura 7 é apresentado um biodigestor com volume de biomassa de 300 m³.



Figura 7 – Biodigestor de 300 m³ [46].

O biogás só apresenta risco de explosão se misturado com oxigênio dentro do biodigestor. Esta situação pode ocorrer durante o início de operação quando do recebimento das primeiras cargas. Para

evitar este problema é prática recomendada a liberação da produção inicial de biogás e não a sua queima. No início da operação os registros de saída do biogás devem ser mantidos fechados até que a manta esteja totalmente inflada. Em seguida libera-se todo o gás até a manta voltar à posição inicial. Fecha-se novamente o registro de saída do biogás e aguarda-se novamente que a manta infle. A partir desse momento o sistema está pronto e o biogás pode ser utilizado e mesmo que haja pequenos vazamentos através da manta, o ar não entrará no interior do biodigestor, mas tão logo se detecte vazamento o mesmo deve ser reparado [47].

6.1.2 – Biodigestor tipo Batelada

É um biodigestor do tipo descontínuo, isto é, que fornece biogás durante certo período, sendo interrompido para a descarga do material fermentado e nova carga de material orgânico a ser digerido.

Este tipo de biodigestor também pode ser construído em alvenaria, concreto ou aço. Sua alimentação e produção de biogás são descontínuas. A matéria orgânica a ser digerida é colocada na câmara de digestão e então fechada (selada) hermeticamente, sendo que só há uma saída para o gás. Este gás produzido pode ser armazenado em tanque separado para posterior utilização ou ser usado enquanto é produzido.

A instalação desse tipo de biodigestor, devido às suas características, pode ser feita com a utilização de somente um tanque ou vários tanques em série [45].

Após o encerramento da produção de gás é feita a limpeza da câmara, um novo carregamento de material orgânico é feito e com isso nova produção de biogás tem início.

Dependendo da quantidade e qualidade dos materiais utilizados na digestão, a produção de gás pode durar de três a seis meses [12].

Nas figuras 8 e 9 são apresentadas as representações de um biodigestor tipo Batelada.

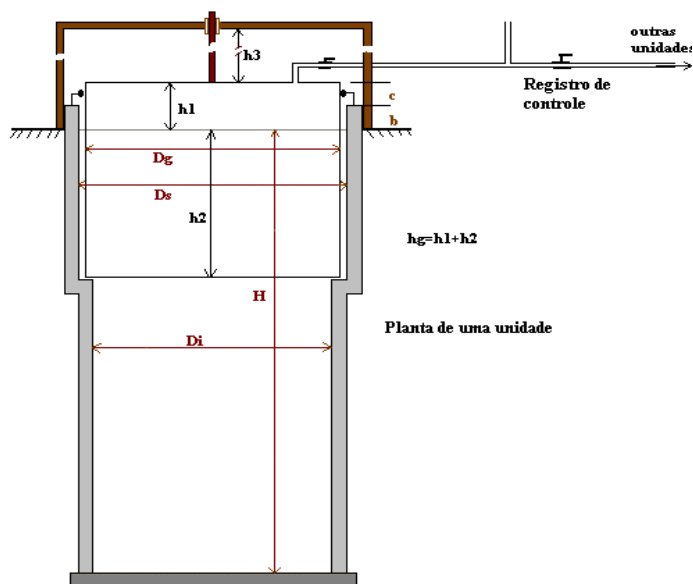


Figura 8 – Biodigestor tipo Batelada [21].

Sendo:

- **Di**: diâmetro interno do biodigestor;
- **Ds**: diâmetro interno da parede superior;
- **Dg**: diâmetro do gasômetro
- **H**: altura do nível do substrato;
- **h1**: altura ociosa do gasômetro;
- **h2**: altura útil do gasômetro;
- **h3**: altura útil para deslocamento do gasômetro;
- **b**: altura da parede do biodigestor acima do nível do substrato;
- **c**: altura do gasômetro acima da parede do biodigestor



Figura 9 – Representação tridimensional em corte do biodigestor tipo Batelada [21].

6.2 – Outros modelos de biodigestores

No Brasil e no mundo existem muitos outros modelos de biodigestores em funcionamento. No caso brasileiro, diversos modelos têm sido avaliados e utilizados por grandes empresas, as quais empregam biodigestores do tipo industrial.

O modelo Jaboticabal foi projetado pelo Departamento de Engenharia Rural da Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias da UNESP (Universidade Estadual de São Paulo), em Jaboticabal. Esse modelo foi baseado no modelo indiano, mas com medidas adaptadas, visando à utilização de esterco misturado com água. Isso se deve ao fato de que o esterco de vaca, porco e galinha são geralmente desperdiçados nas pequenas propriedades agrícolas em todo o Brasil [15].

A Tabela 7 apresenta a comparação dos biodigestores modelos Chinês, Indiano e Marinha (nacional).

Tabela 7 – Comparação entre três modelos de biodigestores (adaptado)

	Chinês	Indiano	Marinha (nacional)
Materiais	Tijolo, cimento, pedra e areia.	Tijolo, cimento, pedra, areia, ferro ou alumínio.	Tijolo, cimento, pedra, areia e plástico.
Isolamento térmico	Feito dentro da terra: bom isolamento natural, a temperatura constante	Tem perdas de calor pela câmara de gás metálica, difícil de isolar. Menos indicado para climas frios.	Não tem problema de perda de calor.
Perdas de gás	A parte superior deve ser protegida com materiais impermeáveis e não porosos; difícil obter construção estanque.	Sem problemas.	Sem problemas.
Manutenção	Deve ser limpo uma ou duas vezes ao ano.	A câmara de gás deve ser pintada uma vez ao ano.	Deve ser limpo uma vez ao ano.

Fonte: Barrera, 2003 [15].

7 – Produção de Biogás em Abatedouros/Frigoríficos

Para estimar a quantidade de biogás gerada em um abatedouro/frigorífico de bovino consideram-se os dados contidos na Tabela 8, retirada do Guia Técnico Ambiental de Abates (Bovino e Suíno) – série P+L [49] e da Tabela 9, retirada da Circular Técnica nº. 9 [20].

Segundo dados da Tabela 8, as perdas (sangue e pedaços de carne), conteúdos estomacais e intestinais representam aproximadamente 26 kg por cabeça abatida, assim como a quantidade de sangue representa aproximadamente 12 kg. Isso representa um total de 38 kg por cabeça abatida (animal de 400 kg), e que pode ser utilizado como material orgânico para abastecer o biodigestor.

Tabela 8 – Produtos e subprodutos do abate de um bovino de 400 kg

Produto/Subproduto	Peso (kg)	Porcentagem do peso vivo (%)
Peso vivo	400,0	100,0
Carne desossada	155,0	38,75
Material não comestível para graxaria (ossos, gorduras, cabeça, partes condenadas, etc.)	152,0	38,0
Couro	36,0	9,0
Vísceras comestíveis (língua, fígado, coração, rins, etc.)	19,0	4,75
Sangue	12,0	3,0
Outros (conteúdos estomacais e intestinais, perdas – sangue, carne, etc.)	26,0	6,5

Fonte: Pacheco e Yamanaka, 2006 [49].

De acordo com a Tabela 9, cada quilograma de resíduo de abatedouro/frigorífico dá origem a 0,07 m³ de biogás.

Tabela 9 – Diferentes substratos para digestores e sua conversão em biogás

Substrato	Quantidade (kg)	Biogás (m ³)
Esterco fresco de bovino	10,00	0,40
Esterco seco de galinha	10,00	4,30
Esterco seco de suíno	10,00	2,50
Resíduo vegetal seco	10,00	4,00
Resíduo de abatedouro/frigorífico	10,00	0,70
lixo	10,00	0,50

Fonte: Filho, 1981 (modificado) [20].

Segundo informações obtidas com o proprietário do abatedouro/frigorífico de pequeno porte, situado no município de Lupércio (SP) e objeto de estudo deste trabalho, foram obtidos dados referentes à quantidade de animais abatidos no estabelecimento. De acordo com esses dados, o número de animais

abatidos mensalmente é apresentado na Tabela 10. O abate pode ser considerado bem distribuído (uniforme) durante os meses e até mesmo durante os dias de cada mês.

Tabela 10 – Quantidade de animais abatidos mensalmente

Mês	Quantidade (bovinos)
Junho, 2007	1650
Julho, 2007	1500
Agosto, 2007	1600
Setembro, 2007	1700
Outubro, 2007	1450
Novembro, 2007	1500
Dezembro, 2007	1800
Janeiro, 2008	1550
Fevereiro, 2008	1400
Março, 2008	1300
Abril, 2008	1700
Maio, 2008	1500

Levando em conta que o abate é efetuado de segunda-feira a sexta-feira e considerando que o número de abates diário seja constante em cada mês, pode-se estimar a quantidade de animais abatidos mostrada na Tabela 11.

Tabela 11 – Animais abatidos diariamente a cada mês

Mês	Animais abatidos diariamente
Junho, 2007	82,50
Julho, 2007	75,00
Agosto, 2007	80,00
Setembro, 2007	85,00
Outubro, 2007	72,50
Novembro, 2007	75,00
Dezembro, 2007	90,00
Janeiro, 2008	77,50
Fevereiro, 2008	70,00
Março, 2008	65,00
Abril, 2008	85,00
Maio, 2008	75,00

Utilizando os dados pode-se efetuar o cálculo da quantidade de biogás gerado diariamente em:

$$V_{\text{biogás}} = Q_{\text{dejeito}} \times N_{\text{animais}} \times F_{\text{conversão}} \quad (11)$$

Sendo:

- $V_{\text{biogás}}$: volume de biogás produzido diariamente;
- Q_{dejeito} : quantidade de dejetos produzida por cabeça abatida, perdas (38 kg/cabeça);

- N_{animais} : número de animais abatidos diariamente;
- $F_{\text{conversão}}$: fator de conversão da matéria orgânica em biogás ($0,07 \text{ m}^3/\text{kg}$).

Com isso a quantidade de biogás potencialmente gerado diariamente é apresentada na Tabela 12.

Tabela 12 – Biogás produzido diariamente

Mês	Biogás produzido diariamente (m^3)
Junho, 2007	219,45
Julho, 2007	199,50
Agosto, 2007	212,80
Setembro, 2007	226,10
Outubro, 2007	192,85
Novembro, 2007	199,50
Dezembro, 2007	239,40
Janeiro, 2008	206,15
Fevereiro, 2008	186,20
Março, 2008	172,90
Abril, 2008	226,10
Mai, 2008	199,50

Uma mistura gasosa com gases que não reagem entre si comporta-se como um gás único puro. Por esse fato, pode-se tratar o ar como sendo um gás único quando se quer usar a lei do gás ideal para prever suas propriedades. Mesmo a lei do gás ideal, sendo uma lei limite, é na realidade razoavelmente correta a pressões normais, podendo ser usada como ponto de partida na discussão de gases [50]. Então, pode-se utilizar a lei do gás ideal para estimar a quantidade de metano e gás carbônico (em número de mols ou em volume) presente na mistura gasosa (biogás) utilizando a equação (12):

$$PV = nRT \quad (12)$$

Sendo:

- P: pressão do gás (atm);
- V: volume do gás (l);
- n: número de mols;
- R: constante universal dos gases ideais (determinada experimentalmente);
- T: temperatura em Kelvin (K).

De acordo com alguns autores, o biogás terá um poder calorífico inferior entre 4,95 e 7,92 kWh/m^3 , em função da porcentagem de metano presente na mistura de 50 e 80%, respectivamente [1, 11, 12, 13]. Segundo Santos [51], a equivalência energética do biogás é de 6,5 kWh por metro cúbico de gás.

Uma vez eliminado o gás carbônico da mistura gasosa, esse poder calorífico poderá se situar entre o poder calorífico inferior do metano (8.550 kcal/m^3 ou $9,94 \text{ kWh/m}^3$) e o poder calorífico superior do metano (9.520 kcal/m^3 ou $11,07 \text{ kWh/m}^3$) [9, 10].

Se forem consideradas a pressão de uma atmosfera (1 atm.), a temperatura de 25°C (298 K), a constante dos gases (R) sendo $8,20578 \times 10^{-2} \text{ L atm K}^{-1} \text{ mol}^{-1}$, Massa molar (M) do gás carbônico de $44,01 \text{ g/mol}$ e Massa molar (M) do gás metano de $16,04 \text{ g/mol}$ [50] e os volumes mínimo ($172,9 \text{ m}^3$) e máximo ($239,4 \text{ m}^3$) de gás produzido diariamente durante o período estudado, a quantidade de gás metano e gás carbônico calculadas são estimadas, em número de moles e massa (kg), em:

(a) Volume mínimo de gás produzido ($172,9 \text{ m}^3$) com 50% vol. de metano na mistura:

$$n_{\text{CO}_2} = 3.535,32 \text{ mols};$$

$$m_{\text{CO}_2} = 155,58 \text{ kg};$$

$$n_{\text{CH}_4} = 3.535,32 \text{ mols};$$

$$m_{\text{CH}_4} = 56,70 \text{ kg}.$$

(b) Volume mínimo de gás produzido ($172,9 \text{ m}^3$) com 80% vol. de metano na mistura:

$$n_{\text{CO}_2} = 1.414,13 \text{ mols};$$

$$m_{\text{CO}_2} = 62,23 \text{ kg};$$

$$n_{\text{CH}_4} = 5.656,51 \text{ mols};$$

$$m_{\text{CH}_4} = 90,73 \text{ kg}.$$

(c) Volume máximo de gás produzido ($239,40 \text{ m}^3$) com 50% vol. de metano na mistura:

$$n_{\text{CO}_2} = 4.895 \text{ mols};$$

$$m_{\text{CO}_2} = 215,43 \text{ kg};$$

$$n_{\text{CH}_4} = 4.895 \text{ mols};$$

$$m_{\text{CH}_4} = 78,51 \text{ kg}.$$

(d) Volume máximo de gás produzido ($239,4 \text{ m}^3$) com 80% vol. de metano na mistura:

$$n_{\text{CO}_2} = 1.958 \text{ mols};$$

$$m_{\text{CO}_2} = 86,17 \text{ kg};$$

$$n_{\text{CH}_4} = 7.832 \text{ mols};$$

$$m_{\text{CH}_4} = 125,62 \text{ kg}.$$

Sendo:

n_{CO_2} : número de mols de gás carbônico;

m_{CO_2} : massa de gás carbônico;

n_{CH_4} : número de mols de metano;

m_{CH_4} : massa de metano.

A queima do metano na presença de ar produz, além de dióxido de carbono e água, grande quantidade de calor. Essa reação é dada pelas seguintes reações [50]:



As equações (13) e (14) representam as equações de combustão do gás metano, apresentando o poder calorífico inferior e superior, respectivamente.

7.1 – Geração de energia elétrica a partir do biogás

A produção inicial de biogás pelo efluente é nula, momento em que entram em ação as bactérias hidrolíticas fermentativas e as acetogênicas. Após a ação destas bactérias sobre o efluente criando condições adequadas, entram em ação as arqueas metanogênicas havendo um aumento na produção de biogás que se estabiliza por alguns dias e logo após ocorre uma diminuição gradativa da produção a níveis muito baixos devido à estabilização do material orgânico que passa a ser chamado de afluente (biofertilizante) [7]. Como, no caso estudado, a carga de efluente é constante, a produção diária de biogás também pode ser considerada constante, mesmo durante pequenos intervalos de dias que a mesma deixa de ser feita (sábados, domingos e feriados), ficando a produção condicionada à quantidade de efluente disponível para o processo de biodigestão.

O biogás produzido diariamente pode ser utilizado na geração de energia elétrica, tentando-se com isso o abatimento total ou parcial do consumo de energia elétrica da concessionária local. Para isso, é necessário um estudo dos equipamentos que podem ser utilizados nessa tarefa e os horários que os mesmos devem entrar em operação caso a quantidade de biogás não seja suficiente para suprir a carga durante todo o tempo de operação do abatedouro.

Havendo excedente de biogás após o uso na geração de energia elétrica, o mesmo pode ser armazenado para posterior utilização ou, dependendo da quantidade excedente, ser utilizado no aquecimento de caldeiras para geração de vapor.

Como pode ser observada na Tabela 12, a produção de biogás varia de acordo com o número de animais abatidos diariamente, conseqüentemente com a quantidade de matéria orgânica que é produzida (dejetos ou resíduos do abatedouro).

Como é feita uma estimativa da possibilidade de geração de energia elétrica a partir da queima do biogás produzido em um biodigestor, dá-se preferência por fazer uma análise entre o menor valor de biogás gerado diariamente ($172,9 \text{ m}^3$) e o maior valor de biogás gerado diariamente (240 m^3), partindo-se do pressuposto que qualquer quantidade adicional gerada será um bônus a favor da geração de energia elétrica e, portanto, do êxito do projeto.

Segundo especialistas de empresas do ramo de biogás [52], foram indicados dois geradores que podem atender às exigências do abatedouro. São dois grupos, sendo um de 20 kW e o outro grupo de 29 kW.

(a) As especificações dos grupos geradores de 20 kW e 29 kW são as seguintes [52]:

Motor:

- Motor Ford 6 cilindros, modelo 4.9 i, Ciclo Otto – original a gasolina;
- Ignição eletrônica;
- Sistema de arrefecimento com ventilador axial montado no eixo;
- Sensor de pick-up e módulo de controle – equipamento que faz o controle de rotação quando da entrada e saída de carga;
- Controle de rotação eletrônico – Marca Biogás (atuador linear);
- Painel de controle do motor composto por horímetro, relógio de temperatura, chave de partida e proteção contra elevação da temperatura do motor;
- Potência máxima contínua: 20 kW;
- Potência máxima contínua: 29 kW;

Gerador:

- Gerador Kohlbach Bei – 4 pólos, 1800 rpm (eletrônico);
- Painel de comando do gerador com transferência de carga manual, voltímetro e frequencímetro.

Outras características:

- Chassi fabricado em chapa de aço carbono com perfil U 4”;
- Dimensões (mm): 800 x 1200 x 2000;
- Acoplamento com disco flexível;
- Equipamento desenvolvido para trabalhar 24 horas;
- Consumo de biogás: 15 m³/h (10,5 m³ CH₄/h);
- Manutenção: retífica do motor a cada 3.000 h.

O equipamento, acima especificado, teve seu custo estipulado em R\$ 24.500,00 (dez. 2008).

Outros dois grupos geradores, de menor potência, que poderiam ser utilizados em conjunto com o grupo gerador citado anteriormente são os seguintes [53]:

(b) Gerador modelo B4T-5.000, linha biogás.

Especificações:

- Motor Branco, monocilíndrico, 4 tempos, 389 cm³, refrigerado a ar e OHC;
- Dimensões (mm): 695 x 555 x 580;
- Ignição: CDI;
- Consumo: 2,0 m³/h (1,4 m³ CH₄/h);
- Potência máxima: 4 kW (para uso em biogás);
- Potência nominal: 3,6 kW (para uso em biogás);
- Voltagem: 110/220 (bi-volt);
- Corrente de carga (A): 8,3;
- Sistema de partida: manual e elétrica;
- Transporte: compacto e portátil;
- Sistema de filtro integrado que permite a conexão do motor direto ao biodigestor;
- Recomendado para trabalhar de 16 a 18 horas por dia;
- Manutenção preventiva: troca do óleo do motor a cada seis meses ou 1.000 h.; verificação do filtro de ar a cada uso e troca do mesmo a cada três meses ou 500 h.; verificação e troca da vela de ignição a cada 12 meses ou 5.000 h.; troca do filtro de biogás a cada seis meses ou 1.000 h.; verificação da folga de válvulas e troca das mesmas a cada 12 meses ou 5.000 h.; limpeza do cabeçote a cada 1.000 h.

Custo total igual a R\$ 3.799,00 (set. 2007).

(c) Gerador modelo B4T-10.000, linha biogás.

Segue as mesmas especificações do modelo anterior, sendo que a diferença está relacionada ao consumo e potência nominal.

- Potência nominal: 8,5 kW (para uso em biogás);
- Consumo: 4,0 m³/h (2,8 m³ CH₄/h).

Custo total igual a R\$ 10.000,00 (set. 2007).

Considerando o período de trabalho do abatedouro de oito horas diárias e a máxima (239,4 m³/dia) e mínima (172,9 m³/dia) produção de biogás para o período estudado, podem-se fazer algumas projeções para o sistema de geradores.

Segundo a conta de energia elétrica do abatedouro, de dezembro de 2007, emitida pela concessionária local, nota-se a existência de duas tarifas sobre a energia consumida. Uma tarifa é cobrada sobre a energia consumida no horário fora de ponta, sendo o valor de R\$ 0,158894 por kWh e a outra tarifa é cobrada sobre a energia consumida no horário de ponta, sendo o valor de R\$ 0,86292 por kWh. Fica claro que é mais interessante priorizar o suprimento da carga no horário de ponta já que o valor da tarifa por kWh é 5,4 vezes maior que a tarifa cobrada fora do horário de ponta. Ainda, analisando a conta de energia elétrica do abatedouro, verifica-se que a energia elétrica consumida (E_c) durante o período de ponta de carga se mantém constante e não ultrapassa o valor de 2.400 kWh ao mês.

Como o período de ponta de carga (T_{pc}) é o intervalo de três horas consecutivas entre 17 e 22 horas de cada dia, exceto sábados, domingos e feriados nacionais, e levando em conta que o funcionamento do abatedouro é de 20 dias por mês pode-se prever que a potência requerida (P_r) nesse período é de aproximadamente 40 kW, segundo equação (15):

$$P_r = \frac{E_c}{N_d \times T_{pc}} \quad (15)$$

Sendo:

- P_r : potência requerida (kW);
- E_c : energia consumida (2.400 kWh);
- N_d : número de dias trabalhado (20 dias por mês);
- T_{pc} : período de ponta de carga (3 horas).

Então, para conseguir suprir a potência consumida ou exigida pelo abatedouro durante o período de ponta de carga e garantir uma margem de tolerância é necessária a utilização de dois grupos geradores de 29 kW cada, totalizando 58 kW, sendo gasto na aquisição dos equipamentos aproximadamente R\$

49.000,00. Este sistema, composto pelos dois geradores, consumirá 30 metros cúbicos de biogás por hora, sendo que a autonomia do sistema está relacionada ao volume de biogás disponível.

Como a produção de gás é constante e não há consumo aos sábados e domingos há um excedente de gás após o final de semana. O excedente de dois dias de produção de biogás varia entre 345,8 m³ (172,9 m³/dia) e 478,8 m³ (239,4 m³/dia) o que representa um acréscimo de 69,16 m³ ou 95,76 m³ para cada dia de funcionamento do sistema de dois geradores.

Então, com a menor produção diária de biogás (173 m³) somada ao excedente correspondente (69,16 m³) a autonomia de funcionamento do sistema ($Aut_{sistema}$) seria de aproximadamente oito horas, enquanto que com a maior produção diária de biogás (240 m³) somada ao excedente correspondente (95,76 m³) a autonomia de funcionamento do sistema seria de aproximadamente 11 horas, segundo equação (16):

$$Aut_{sistema} = \frac{V_{biogás}}{C_{sistema}} \quad (16)$$

Sendo:

- $Aut_{sistema}$: autonomia do sistema de geração de energia elétrica (em horas);
- $V_{biogás}$: volume de biogás disponível (242,16 m³ a 335,76 m³);
- $C_{sistema}$: consumo de biogás pelo sistema (30 m³ biogás/hora).

Portanto, com os geradores funcionando oito ou 11 horas diárias durante 20 dias ao mês (dias úteis) a energia elétrica gerada (E_g) seria de 9.280 kWh a 12.760 kWh, segundo equação (17):

$$E_g = N_h \times N_d \times P_{sistema} \quad (17)$$

Sendo:

- E_g : Energia gerada (kWh);
- N_h : número de horas que o sistema é ligado (cinco a 11 horas);
- N_d : número de dias trabalhado, quando o sistema é ligado (20 dias por mês);
- $P_{sistema}$: potência instalada do sistema (58 kW).

Portanto, com o sistema operando durante as três horas do período de consumo na ponta de carga haveria excedente que seria utilizado para suprir parte da energia consumida fora do período de ponta, resultando em uma economia total (ECO_{total}) de R\$ 3.164,20 ou R\$ 3.717,15 ao mês, segundo equação

(20). A economia fora do período de ponta ($ECO_{foradepona}$) seria de R\$ 1.093,20 ou R\$ 1.646,15, segundo equação (18), e a economia durante o período de ponta seria de R\$ 2.071,00, segundo equação (19):

$$ECO_{foradepona} = E_{g\ foradepona} \times V_{kWh\ foradepona} \quad (18)$$

$$ECO_{ponta} = E_{g\ ponta} \times V_{kWh\ ponta} \quad (19)$$

$$ECO_{total} = ECO_{foradepona} + ECO_{ponta} \quad (20)$$

Sendo:

- ECO_{total} : economia total gerada pelo sistema (R\$/mês);
- $ECO_{foradepona}$: economia gerada pela geração fora do período de ponta (R\$);
- ECO_{ponta} : economia gerada pela geração no período de ponta (R\$);
- $E_{g\ foradepona}$: energia gerada fora do período de ponta (de 6.880 a 10.360 kWh);
- $E_{g\ ponta}$: energia gerada no período de ponta (2.400 kWh);
- $V_{kWh\ foradepona}$: valor do kWh fora do período de ponta (R\$ 0,158894/kWh);
- $V_{kWh\ ponta}$: valor do kWh no período de ponta (R\$0,86292/kWh).

Na análise econômica do projeto é de grande importância o cálculo do tempo de retorno do investimento que pode ser realizado com ferramentas da matemática financeira.

O cálculo do período de retorno descontado (PRD) (equação 23) mede o prazo necessário, em anos, para se recuperar o capital investido. Este cálculo leva em conta o investimento inicial (Inv. inicial, em R\$), a economia anual proporcionada pelo projeto (Econ./ano, em R\$/ano), o tempo de vida útil do empreendimento em anos (n), a taxa de desconto (d), o fator de recuperação do capital (FRC) (equação 2) e o período de retorno simples em anos (PRS) (equação 21) [54]:

$$PRS = \frac{Inv.\ inicial(R\$)}{Econ./\ ano(R\$/\ ano)} \quad (21)$$

$$FRC_{(d,n)} = \frac{d \times (1+d)^n}{(1+d)^n - 1} \quad (22)$$

$$PRD = n \times FRC_{(d,n)} \times PRS \quad (23)$$

O cálculo do custo da energia gerada (CEG) ou custo da energia economizada (CEE) pelo gerador (equação 29), em R\$/kWh, pode ser realizado utilizando as equações apresentadas a seguir [54]. Para tanto, é necessário o cálculo do fator de descapitalização (equação 24), do fator de amortização (equação 25), do valor presente acumulativo para os gastos anuais fixos em manutenção (equação 26), do custo do ciclo de vida (equação 27) e do custo do ciclo de vida anualizado (equação 28) como apresentado:

$$X = \frac{1+i}{1+d} \quad (24)$$

$$P_a = \frac{1-X^n}{1-X} \quad (25)$$

$$VP1 = P_a \times CI \quad (26)$$

$$CCV = Inv. inicial + VP1 \quad (27)$$

$$CCVA = \frac{CCV}{X \times P_a} \quad (28)$$

$$CEE = CEG = \frac{CCVA(R\$)}{E_g / ano(kWh / ano)} \quad (29)$$

Sendo:

X: fator de descapitalização (adimensional);

P_a: fator de amortização (adimensional);

VP1: valor presente acumulativo para os gastos anuais fixos em manutenção (em R\$);

Inv. inicial: investimento inicial de instalação do biodigestor e geradores (R\$ 61.842,96);

CCV: custo do ciclo de vida (em R\$);

CCVA: custo do ciclo de vida anualizado (em R\$);

CI: valor gasto anualmente em manutenção (estimado em R\$ 200,00);

i: taxa de inflação (4,5%_{aa});

d: taxa de desconto (10%_{aa});

n: vida útil do empreendimento (20 anos);

E_g/ano: energia gerada anualmente (kWh/ano).

Na realização dos cálculos, a energia gerada considerada foi referente à menor quantidade e maior quantidade de gás disponível, ou seja, ao menor número de abate diário do período (março de 2008, 65 animais ao dia) e ao maior número de abate diário do período (dezembro de 2007, 90 animais ao dia). Então, os respectivos valores são 9.280 kWh/mês, totalizando 111.360 kWh/ano ou R\$ 37.970,40/ano, e 12.760 kWh/mês, totalizando 153.120 kWh/ano ou R\$ 44.605,80/ano.

Com o investimento inicial de R\$ 61.842,96, a economia anual de R\$ 37.970,40 ou R\$ 44.605,80, a taxa de inflação (i) de 4,5%_{aa}, estipulada pelo Conselho Monetário Nacional para 2009 [55], e o período de vida útil (n) dos equipamentos, biodigestor e geradores, sendo de 20 anos, o período de retorno simples (equação 21), o fator de recuperação de capital (equação 22) e o período de retorno descontado (equação 23) são mostrados na Tabela 13.

Tabela 13 – Período de retorno simples e descontado

	Menor volume de gás	Maior volume de gás
FRC _(d, n)	0,1174	0,1174
PRS (anos)	1,63	1,40
PRD (anos)	3,83	3,30

Considerando a taxa de desconto (d) de 10%_{aa} para equipamentos elétricos [56] e a vida útil dos equipamentos de 20 anos, podemos obter os valores para o custo do ciclo de vida (CCV) e do custo do ciclo de vida anualizado (CCVA) como mostrados na Tabela 14.

Tabela 14 – Cálculo do custo do ciclo de vida anualizado (CCVA)

Variáveis	Valor
X (adimensional)	0,95
P _a (adimensional)	12,8302
VP1 (R\$)	2.566,04
CCV (R\$)	64.409,00
CCVA(R\$)	5.284,32

Com o custo do ciclo de vida anualizado (CCVA) de R\$ 5.284,32 (Tabela 14) e a energia gerada anualmente (E_g) de 111.360 kWh (menor volume de gás disponível) ou 153.120 kWh (maior volume de gás disponível), o custo da energia economizada (CEE) ou gerada (CEG) é de R\$ 0,0474/kWh ou R\$ 0,0345/kWh, respectivamente.

7.2 – Dimensionamento do biodigestor

Como a produção de resíduos no abatedouro se dá praticamente em todos os dias úteis de cada mês, havendo a possibilidade de alimentação diária do biodigestor, deve-se optar pela utilização de biodigestores tipo Indiano, tipo Chinês ou tipo Marinha. Outro fator que compete para a escolha é a necessidade de que a produção de biogás seja diária, ou seja, contínua, sendo possível somente com a utilização de um desses três tipos.

Como a produção do abatedouro sofre grande variação, de 1800 abates no mês de dezembro de 2007 (90 abates diário) a 1300 abates no mês de março de 2008 (65 abates diário), este fato deve ser levado em consideração durante o dimensionamento do biodigestor. Deve-se dimensionar o sistema para comportar a máxima carga de resíduos e assim, assegurar que o tempo de retenção mínimo será respeitado, garantindo desse modo o bom funcionamento do biodigestor.

Outro fator de extrema importância a ser considerado é o tempo de detenção necessário. Como já exposto, para resíduos de abatedouro/frigorífico, o tempo de detenção necessário é de 20 a 30 dias, sendo que nesse período os resultados obtidos são satisfatórios e o efluente apresenta características que podem enquadrá-lo dentro das normas impostas pelo decreto N° 8.468/76 [32].

Então, o biodigestor deve ser capaz de receber grande carga diariamente, o que exige uma grande câmara de fermentação que seja capaz de armazenar o volume de resíduos referentes, portanto a melhor opção é o biodigestor tipo Marinha.

Como já exposto anteriormente, o gasômetro no biodigestor tipo Marinha é formado pela manta de vinil, o que não confere alta pressão à mistura gasosa então, se na instalação houver algum equipamento que necessite de uma maior pressão na mistura gasosa deve-se utilizar um compressor para esta finalidade.

7.2.1 – Determinação do consumo diário de biogás

Como a intenção é a geração de energia elétrica objetivando a independência energética do abatedouro, é necessário que todo o biogás produzido seja utilizado na geração de energia para que o projeto tenha êxito. Neste caso utiliza-se o maior volume de biogás gerado, que corresponde, respectivamente, ao maior volume de dejetos produzido, garantindo dessa forma a máxima geração de energia elétrica e que todo o sistema estará apto a receber e tratar todo o resíduo produzido, garantindo com isso a possibilidade de enquadramento do afluentes dentro da classe de água imposta pelo decreto Nº 8.468/76 [32]. É interessante que todo o resíduo seja estabilizado pelo biodigestor como garantia de que a máxima produção de gás foi atingida e também caso haja a necessidade de instalação de uma estação de tratamento de dejetos para o tratamento do efluente, esta seja simples e de fácil operação, reduzindo-se com isso os gastos e maximizando o lucro da empresa.

Diante disso, fica evidente que se deve trabalhar com o maior número de abate e o maior volume de gás produzido diariamente que são, respectivamente, 90 animais abatidos com produção prevista de 240 m³ de biogás ao dia, valores atingidos no mês de dezembro de 2007.

7.2.2 – Determinação do período crítico

Período crítico é o período em que ocorre o consumo do biogás produzido.

Deve ser dada prioridade para que os geradores entrem em funcionamento para suprir a demanda durante o período de ponta de carga quando a tarifa de energia elétrica é 5,4 vezes maior que a praticada fora do período de ponta, portanto, o período crítico coincide com o período de ponta de carga.

Como foi estimado anteriormente, há excedente de biogás suficiente para gerar energia para o abatedouro, logo se pode optar por ligar o sistema antes do período de ponta de carga.

7.2.3 – Determinação do consumo de biogás durante o período crítico ($V_{c_{pc}}$)

Como o período crítico corresponde a três horas e o sistema de geração consome 30 m³ de biogás por hora, o consumo total de biogás será de 90 m³ de biogás, segundo equação (30):

- Volume de biogás consumido durante o período crítico ($V_{c_{pc}}$):

$$V_{c_{pc}} = T_{pc} \times C_{sistema} \quad (30)$$

Sendo:

- $V_{c_{pc}}$: volume de biogás consumido durante o período crítico (m^3);
- T_{pc} : período de ponta de carga (3 horas);
- $C_{sistema}$: consumo do sistema ($30 m^3/hora$).

7.2.4 – Determinação do volume de biogás que deverá estar armazenado no início do período crítico de consumo ($Varm_{pc}$)

Este volume é igual ao volume total de gás necessário durante o período crítico menos o volume de gás produzido durante o período crítico, isso tudo levando em consideração que a produção de gás seja constante durante as 24 horas do dia.

- Volume de biogás produzido durante o período crítico (Vp_{pc}), igual a $30 m^3$, segundo equação (31):

$$Vp_{pc} = \left(\frac{Vp_d}{24} \right) \times T_{pc} \quad (31)$$

Sendo:

- Vp_{pc} : volume de biogás produzido no período crítico (m^3);
- Vp_d : volume de biogás produzido diariamente ($240 m^3$);
- T_{pc} : período de ponta de carga (3 horas).
- Volume de gás que deverá estar armazenado no início do período crítico ($Varm_{pc}$):

$$Varm_{pc} = Vc_{pc} - Vp_{pc} \quad (32)$$

Então, o volume de biogás que deverá estar armazenado no início do período crítico é igual a $60 m^3$, segundo equação (32).

7.2.5 – Determinação do volume de biogás produzido durante o período que não há consumo

O período em que não ocorre consumo de biogás pode ser dividido em dois períodos. Um período seria os finais de semanas, quando a indústria não funciona e outro seriam os períodos que o sistema de geração não está em funcionamento, quando também não há consumo de biogás.

Nos finais de semana (sábado e domingo) a produção de biogás gerado é toda armazenada totalizando um volume entre 345,8 m³ e 478,8 m³, que distribuído durante os dias úteis (cinco dias) representa um incremento diário de biogás disponível entre 69,16 m³ e 95,76 m³.

Como o sistema de geração tem uma autonomia diária de oito a 11 horas, a geração de biogás fora do período de consumo está compreendida entre 13 e 16 horas. Então, considerando a produção de biogás constante ao longo do dia (10 m³/hora) o volume de gás gerado está entre 130 m³ e 160 m³.

7.3 – Dimensionamento do biodigestor contínuo

Na literatura é recomendado que a proporção da mistura dejetos-água seja de 1:1 ou 1:2, ou seja, para cada parte de dejetos deve ser acrescentada uma ou duas partes de água [13, 15]. No caso do abate de bovinos, segundo informações contidas na Tabela 8, os dejetos sólidos passíveis de serem utilizados no biodigestor representam aproximadamente 26 kg (conteúdos estomacais e intestinais, perdas com sangue, pedaços de carne descartados, entre outros). Nota-se então a necessidade de adição de aproximadamente 26 ou 52 litros de água para que a proporção de 1:1 ou 1:2 seja mantida.

O cálculo do volume da câmara de fermentação pode ser feito por meio do cálculo do volume de material orgânico disponível diariamente e do seu potencial gerador de biogás, ou através da previsão da necessidade diária de biogás [23].

Como o sangue também pode ser aproveitado no processo de biodigestão e, segundo a Tabela 8, o mesmo representa aproximadamente 12 kg, fica evidente a necessidade de se adicionar aproximadamente 14 ou 40 litros de água para que as proporções de 1:1 ou 1:2 sejam mantidas. A massa específica do sangue bovino e restos está na faixa de 1,03 a 1,06 g/cm³ [57, 58].

No caso do abatedouro deve-se optar por manter a proporção de 1:2 com a adição de 40 litros de água, além dos 12 litros de sangue (aproximadamente) para manter alta a concentração de matéria orgânica na mistura, com a intenção de se obter uma mistura mais diluída para evitar ao máximo o entupimento dos canos de carga dos efluentes e descarga dos afluentes.

Então, levando-se em conta o abate de 90 animais por dia (dezembro de 2007), o volume da mistura de aproximadamente 65 litros e a produção ocorrendo em vinte dias por mês, pode-se estimar o volume da câmara de digestão (V), segundo equação (33), em:

- Volume da câmara de fermentação (V_{cf}):

$$V_{cf} = N_{abate} \times V_{mistura} \times N_{dias} \quad (33)$$

Sendo:

- N_{abate} : número de animais abatidos;
- $V_{mistura}$: volume da mistura dejetos e água;
- N_{dias} : número de dias em que ocorre o abate.

Então, o volume da câmara de fermentação deve ser de aproximadamente 117 m³.

Dispondo do volume da câmara de digestão pré-determinado (117 m³) e do volume de biogás a ser armazenado (240 m³), pode-se fazer o dimensionamento das medidas do biodigestor.

De acordo com informações fornecidas por um fabricante de biodigestor de manta de vinil, apurou-se que para um pré-dimensionamento e avaliação inicial do custo de confecção do equipamento e análise preliminar da viabilidade de instalação, é prática usar a aproximação da lona, em metros quadrados (m²), que comporá ou formará o reservatório (tanque de dejetos) e a cúpula (reservatório de biogás). No caso da cúpula, utilizar a aproximação do volume de gás decrescido de 8 a 10% para o cálculo aproximado da lona necessária.

No dimensionamento optou-se por uma câmara de digestão com profundidade de 2,0 metros e lados com 7,65 metros de comprimento, totalizando 117,045 m³. Com essas medidas calcula-se a área das paredes da câmara de fermentação que deverão ser recobertas com a manta de vinil preta (0,8 mm de espessura) com o intuito de promover a impermeabilização da mesma. A área total da câmara de digestão é de 119,72 m². Para a formação do reservatório de biogás, a área total de lona de vinil preta (1,0 mm de espessura) necessária é de aproximadamente 220 m². Portanto, a área total de lona necessária para a construção do biodigestor é de aproximadamente 339,72 m².

Em pesquisa de mercado, apurou-se que o preço médio, tanto da manta de vinil usada para promover a impermeabilização do fundo da câmara de biodigestão (0,8 mm de espessura) quanto para a formação do reservatório (cúpula) de biogás (1,0 mm de espessura), é de aproximadamente R\$ 18,00 o metro quadrado (m²), no primeiro trimestre de 2009. Portanto, o gasto com a compra da manta de vinil deve ser da ordem de R\$ 6.114,96.

Para a realização das obras civis, para a construção do tanque em alvenaria, são necessários alguns materiais além da mão de obra especializada. Os materiais necessários, segundo um pré-dimensionamento, são 1.200 blocos de cimento, 5,0 m³ de areia grossa, 4,0 m³ de pedra fina, 40 sacos de cimento, 5,0 kg de arame, 30 barras ferro 3/8 (12,0 m cada barra), 20 barras de ferro 3/16 (12 m cada barra) e 9,0 m³ de concreto.

Em pesquisa de mercado (jul. 2008), apurou-se que os preços médios para os materiais são:

- Bloco de cimento: R\$ 2,00/bloco;
- Areia grossa: R\$ 64,00/m³;
- Pedra fina: R\$ 54,50/m³;
- Cimento: R\$ 19,90/saco;
- Arame: R\$ 38,00/kg;
- Ferro 3/8: R\$ 34,50/barra;
- Ferro 3/16: R\$ 7,45/barra;
- Concreto: R\$ 180,00/m³.

Portanto, para a realização das obras civis serão gastos aproximadamente R\$ 6.728,00 em materiais.

Então, pode-se estimar que o valor final para aquisição do material utilizado na construção do biodigestor seria de aproximadamente R\$ 12.842,96 (lona e materiais para alvenaria).

A mão-de-obra não entrou nos cálculos uma vez que depende da região onde o empreendimento será realizado, da demanda por serviços dessa natureza, do tempo que durará a obra e da complexidade.

Uma questão que deve ser observada é que a construção do tanque não precisa ser feita de alvenaria sendo usualmente realizada a escavação do local nas medidas exatas do dimensionamento da câmara para posterior aplicação direta da manta de vinil, o que significa economia em relação à aquisição dos materiais. No entanto deve ser dada preferência para a construção do tanque em alvenaria uma vez que as paredes representam mais uma barreira física, além da própria manta de vinil, contra a percolação do material orgânico líquido para o solo, caso a manta apresente rasgos ou furos com o tempo, evitando dessa forma uma possível contaminação do lençol freático.

7.4 – Comercialização do biofertilizante

Como exposto anteriormente, o biogás representa de 4 a 7% do peso da Matéria Orgânica inicial [11].

Analisando os valores teóricos obtidos para o caso em estudo nota-se que o biogás representa de 11,64% a 16,15% do peso da Matéria Orgânica inicial. Este valor é uma boa aproximação, uma vez que só foi considerado para os cálculos que o biogás é constituído por gás metano e dióxido de carbono.

Analisando cada caso temos:

(a) Para a produção de 172,9 m³ de biogás, com 50% vol. de CH₄:

$$m_{\text{dejeito}} = 2470 \text{ kg (65 animais abatidos diariamente)}$$

$$m_{\text{CO}_2} = 155,58 \text{ kg}$$

$$m_{\text{CH}_4} = 56,70 \text{ kg}$$

$$m_{\text{dejeito}} / (m_{\text{CO}_2} + m_{\text{CH}_4}) \cong 11,64\%$$

(b) Para a produção de 172,9 m³ de biogás, com 50% vol. de CH₄:

$$m_{\text{dejeito}} = 2470 \text{ kg (65 animais abatidos diariamente)}$$

$$m_{\text{CO}_2} = 62,23 \text{ kg}$$

$$m_{\text{CH}_4} = 90,73 \text{ kg}$$

$$m_{\text{dejeito}} / (m_{\text{CO}_2} + m_{\text{CH}_4}) \cong 16,15\%$$

(c) Para a produção de 172,9 m³ de biogás, com 50% vol. de CH₄:

$$m_{\text{dejeito}} = 3420 \text{ kg (90 animais abatidos diariamente)}$$

$$m_{\text{CO}_2} = 215,43 \text{ kg}$$

$$m_{\text{CH}_4} = 78,51 \text{ kg}$$

$$m_{\text{dejeito}} / (m_{\text{CO}_2} + m_{\text{CH}_4}) \cong 11,64\%$$

(d) Para a produção de 172,9 m³ de biogás, com 50% vol. de CH₄:

$$m_{\text{dejeito}} = 3420 \text{ kg (90 animais abatidos diariamente)}$$

$$m_{\text{CO}_2} = 86,17 \text{ kg}$$

$$m_{\text{CH}_4} = 125,62 \text{ kg}$$

$$m_{\text{dejeito}} / (m_{\text{CO}_2} + m_{\text{CH}_4}) \cong 16,15\%$$

Como a produção de biofertilizante ou de afluente do biodigestor é proporcional ao que entra na câmara de fermentação pode-se pré-fixar uma faixa de produção do mesmo de acordo com o número de

animais abatidos diariamente. Considerando que o menor abate registrado foi de 65 animais ao dia e o maior abate foi de 90 animais ao dia e que a densidade aproximada do efluente é de 1,0 kg/l, a produção de biofertilizante se situa na faixa de 4.971 kg/dia e 6.780 kg/dia ou, 4.971 l/dia e 6.780 l/dia, aproximadamente.

A tonelada do biofertilizante é negociada entre R\$ 30,00 e R\$ 90,00 [59]. Esse é mais um atrativo para a instalação de biodigestor para o tratamento de resíduos industriais, principalmente resíduos com alta concentração orgânica, uma vez que inicialmente a venda do biofertilizante poderá contribuir para o abatimento do investimento inicial e em um segundo momento poderá representar mais uma fonte de renda para a indústria, no caso o abatedouro. Mas, muitas vezes a comercialização do biofertilizante pode ser dificultada pela falta de informação o que em muitos casos torna mais viável a doação do mesmo, evitando-se assim a necessidade de instalação de uma estação de tratamento para o efluente (biofertilizante).

Como a região onde está instalado o abatedouro é uma região agrícola, voltada principalmente para a produção de café, tem-se neste caso um mercado consumidor permanente para o biofertilizante. Levando-se em conta que o abate ocorra em 20 dias por mês ou 240 dias ao ano, pode-se projetar a produção de biofertilizante entre 1.193 t/ano e 1.627 t/ano, o que geraria um retorno financeiro, ao ano, entre R\$ 35.790,00 (R\$ 2.982,50 ao mês) e R\$ 107.000,00 (R\$ 8.947,50 ao mês), para a menor produção ou, um retorno de R\$ 48.810,00 (R\$ 4.067,50 ao mês) e R\$ 146.000,00 (R\$ 12.200,00 ao mês), para a maior produção.

8 – Redução de Emissão de Gases de Efeito Estufa (GEE)

Um dos mais graves problemas enfrentado pela humanidade na atualidade é a mudança global do clima. Este problema vem ganhando força devido à intensificação do efeito estufa, que está relacionado ao aumento da concentração de determinados gases, principalmente o dióxido de carbono, metano, óxido nitroso, hidrofluorcarbonos, perfluorcarbonos e hexafluoreto de enxofre, na atmosfera terrestre [4, 5, 6].

Esses gases são liberados principalmente pela queima de combustíveis fósseis, processos industriais, produção agrícola, desmatamento, queimada das coberturas florestais e tratamento de dejetos [5, 6].

Anualmente, o Homem lança cerca de sete bilhões de toneladas de CO₂ na atmosfera e uma maneira de compensar isto é a criação de projetos de reduções de emissões de gases de efeito estufa [60].

Para que se tenha uma noção da ordem de grandeza, a concentração atmosférica de dióxido de carbono era de 280 partes por milhão (ppm) em volume no período da Revolução Industrial. Nos dias de hoje essa concentração saltou para cerca de 360 partes por milhão em volume [4, 8].

Na busca de se garantir um menor impacto ambiental, é necessária a adequação de efluentes líquidos aos padrões de qualidade aceitáveis e um tratamento de resíduos, o que caracteriza um grande desafio a diversos setores produtivos [8].

Inicialmente, as soluções eram dadas internamente com a construção de depósitos ou aterros de resíduos, geridos pelo próprio produtor. Em um segundo momento, por meio da análise do processo produtivo e aumento da sua eficiência, buscaram-se a redução do uso de matérias-primas e a diminuição na geração de resíduos ao longo da cadeia produtiva. Já, em um terceiro momento, os resíduos passaram a ser vistos como co-produtos que poderiam ser utilizados para atender a demanda de outros setores ou processos produtivos, passando à categoria de insumos [8].

No tratamento anaeróbio ou mesmo na destinação final em aterros sanitários, próprios ou de terceiros, dos resíduos industriais, com alta carga orgânica, existe um potencial de emissão de gases de efeito estufa (GEE), causado principalmente pela geração de gás metano [8].

No âmbito das Nações Unidas, as discussões levaram ao consentimento de que poderia haver três soluções para o problema do efeito estufa e aquecimento global. A primeira delas seria a **adaptação**, a segunda solução seria a denominada **engenharia climática** e a terceira e última a **redução de emissões** de gases de efeito estufa (GEE) [61].

Entende-se por **adaptação** a adoção de políticas capazes de mitigar os efeitos da degradação do meio ambiente frente à impossibilidade de se implantar políticas públicas que evitariam os danos decorrentes das atividades agressivas ao meio [61].

Já por **engenharia climática** entende-se como um conjunto de soluções inovadoras capazes de neutralizar os efeitos das emissões dos gases de efeito estufa sem, contudo, atingir suas fontes geradoras [61].

E por **redução de emissões** de gases de efeito estufa (GEE) entende-se como outro conjunto de soluções, no âmbito privado e público, que visam à diminuição da emissão de gases que causam o efeito estufa e conseqüentemente o aquecimento global, atingindo para isso as fontes geradoras [61].

Apesar de se buscar a criação de soluções baseadas nas três formas mencionadas, os países-membros das Nações Unidas elegeram a **redução de emissões** como sendo a principal forma mitigadora da emissão de GEE e do aquecimento global. Essa decisão está descrita e consubstanciada no Protocolo de Quioto, cujos principais mecanismos, o Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL) e as Reduções Certificadas de Emissões (RCEs), também conhecidas como créditos de carbono, servirão como medidas de combate ao efeito estufa e moeda de troca a determinados países em desenvolvimento [61].

Com a possibilidade de transformar a redução das emissões de gases de efeito estufa (GEE) em projetos de Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL), houve uma maior busca por soluções alternativas na gestão de resíduos e efluentes [62]. Países desenvolvidos podem investir neste tipo de projeto (MDL) em países em desenvolvimento e utilizar os créditos gerados para reduzir suas obrigações, sendo que a venda desses créditos de carbono é uma boa oportunidade para o Brasil [60].

As Partes do Anexo I da Convenção do Clima, em sua grande maioria países desenvolvidos, a partir do momento que adotaram o Protocolo de Quito, comprometeram-se a reduzir, entre os anos de 2008 e 2012, a emissão de gases de efeito estufa a níveis em média 5% inferiores aos níveis de emissão de 1990 [6, 61]. Tal percentagem é uma média, sendo que os compromissos de emissões variam entre 8 e 10% abaixo dos níveis de emissão de 1990. Enquanto o Japão e o Canadá devem reduzir suas emissões em 6%, a Islândia está autorizada a aumentar as emissões em 10%, de acordo com as emissões registradas para cada Parte do Protocolo. Essa variação nas metas a serem cumpridas influencia o comércio de certificados de emissões reduzidas, uma vez que potenciais compradores de créditos de carbono provavelmente serão os países com metas elevadas a serem cumpridas, o que acabará gerando uma grande demanda no mercado de carbono [6, 61].

Com a intenção de tornar possível o cumprimento das metas estabelecidas pelo Protocolo de Quioto, levando em conta que o cumprimento das mesmas exigiria um grande esforço econômico por parte dos países pertencentes às Partes do Anexo I, o Protocolo criou três mecanismos de flexibilização: (a) Implementação Conjunta; (b) Comércio de Emissões; (c) Mecanismo de desenvolvimento Limpo [6, 61].

Neste estudo, faz-se referência somente ao Mecanismo de Desenvolvimento Limpo e ao Comércio de Emissões uma vez que as modificações ou instalação de equipamentos, biodigestor e grupo gerador, no abatedouro contemplam estes dois mecanismos que acabam coexistindo.

8.1 – Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL)

A transformação de redução de emissões de GEE em projetos de MDL é possível a partir do atendimento de regras estabelecidas no Artigo 12 do Protocolo de Quioto e documentos correlatos. A idéia de Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL) é sintetizada por dois conceitos trazidos pelo Protocolo de Quioto, sendo eles a Adicionalidade (*Additionality*) e a Linha de Base (*Baseline*). A Adicionalidade diz que para um projeto ser considerado um Mecanismo de Desenvolvimento Limpo a redução de emissões de gases de efeito estufa ou o aumento da remoção de gás carbônico deve ser adicional à que ocorreria na ausência de tal projeto. Já Linha de Base define um cenário que representa, de forma razoável, as emissões antrópicas (causas pelo Homem) de gases de efeito estufa em um contexto com ausência da atividade de Mecanismo de Desenvolvimento Limpo proposta. Então, pode-se notar que a linha de base servirá tanto para verificação da Adicionalidade quanto para a quantificação das Reduções Certificadas de Emissões (RCE) [6, 8, 61].

O Anexo da Decisão 17/CP.7 definiu Adicionalidade e Linha de Base da seguinte forma [6]:

Art. 43. A atividade de projeto do MDL é adicional se reduzir as emissões antrópicas de gases de efeito estufa por fontes para níveis inferiores aos que teriam ocorrido na ausência da atividade registrada de projeto de MDL;

Art. 44. A Linha de Base de uma atividade de projeto de MDL é o cenário que representa, de forma razoável, as emissões antrópicas de gases de efeito estufa por fontes que ocorreriam na ausência da atividade de projeto proposta.

A Linha de Base deve ser calculada especificamente para cada projeto de MDL, com uma metodologia aprovada pelo Conselho Executivo do MDL, segundo arts. 37 a 52 do Anexo da Decisão 17/CP. 7 [6, 61].

Para que um projeto receba a certificação das Nações Unidas e seja classificado como um projeto de desenvolvimento limpo, o mesmo deve passar por sete etapas que são: elaboração de concepção de projeto; validação; aprovação pela Autoridade Nacional Designada (AND), que no Brasil é a Comissão Interministerial de Mudança Global do Clima (CIMGC); submissão ao Conselho Executivo (CE) para registro; monitoramento; verificação/certificação; e concessão das RCE [5, 6, 42, 61, 63].

A primeira etapa do ciclo é a elaboração do Documento de Concepção de Projeto (DCP), de responsabilidade dos participantes do projeto. Esse documento deve conter, entre outros itens, a descrição

das atividades de projeto, os participantes do projeto, a metodologia da linha de base, a metodologia para o cálculo da redução de emissões de gases de efeito estufa, o estabelecimento dos limites da atividade de projeto, as fugas e o plano de monitoramento.

Ainda, em relação ao Documento de Concepção de Projeto, o mesmo deve conter informações referentes à definição do período de obtenção de créditos, a justificativa para a adicionalidade do projeto, o Estudo de Impacto Ambiental (EIA), o Relatório de Impacto Ambiental (RIMA), informações a respeito da utilização de linhas de financiamento e comentários dos atores do projeto [61, 64].

A segunda etapa é a validação. Essa etapa corresponde à avaliação independente do projeto por uma Entidade Operacional Designada (EOD), que avalia os requisitos do Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL) com base no Documento de Concepção de Projeto (DCP) [61, 64].

A terceira etapa é a aprovação do projeto. Nessa etapa a Autoridade Nacional Designada (AND) atesta a contribuição da atividade para o desenvolvimento sustentável do país onde é desenvolvido o projeto de MDL e a AND das Partes envolvidas confirma a participação voluntária. No Brasil, os projetos são analisados pela Comissão Interministerial de Mudança Global do Clima (CIMGC) segundo cinco critérios básicos: distribuição de renda, sustentabilidade ambiental local, desenvolvimento das condições de trabalho e geração líquida de emprego, capacitação e desenvolvimento tecnológico, e integração regional e articulação com outros setores [61, 64].

A aprovação do projeto pelo Conselho Executivo do MDL é subsequente à aprovação pela Autoridade Nacional Designada (AND), que no caso do Brasil é a Comissão Interministerial de Mudança Global do Clima (CIMGC). Fica claro que a aprovação pela CIMGC é necessária para a continuidade do projeto, mas não é suficiente para garantir sua aprovação quando submetido ao Conselho Executivo do MDL que pode vetar tal projeto [61, 64].

Sendo o projeto aprovado pelo Conselho Executivo do MDL, os passos seguintes são o monitoramento, verificação/certificação e concessão das RCEs.

As áreas de atuação e de possível atuação dos projetos de MDL são variadas, mas existe uma predominância na geração de energia. Nas atividades desenvolvidas destacam-se a captação de gás de aterro sanitário, geração de energia eólica, troca de combustíveis e captação de gases gerados na suinocultura (gás metano) [60].

Deve-se observar que quanto mais avançado o projeto estiver no ciclo do projeto de MDL, maior será o valor pago aos créditos de carbono gerados ou a serem gerados, devido à maior certeza da quantidade de créditos a serem produzidos e a diminuição dos riscos envolvidos na aprovação do projeto [6, 61].

Por meio de sua Resolução nº 3, de 24 de março de 2006 (Resolução nº 3/2006), a Comissão Interministerial de Mudança Global do Clima (CIMGC) estabeleceu os procedimentos para aprovação das

atividades de projeto de pequena escala no âmbito do MDL. As seguintes atividades são consideradas elegíveis a projetos de pequena escala, de acordo com a Resolução nº 3/2006, cuja base encontra-se no § 6º da Decisão nº 17/CP.7 [61]:

- Atividades de projetos de energia renovável com capacidade máxima de produção equivalente de 15 megawatts (ou uma equivalência adequada) (Decisão nº 17/CP.7, § 6º, alínea c, item I);
- Atividades de projetos de melhoria da eficiência energética que reduzam o consumo de energia, do lado da oferta e/ou demanda, até o equivalente a 15 gigawatt-hora por ano (Decisão nº 17/CP.7, § 6º, alínea c, item I);
- Outras atividades de projeto que tanto reduzam emissões antrópicas por fontes quanto emitam diretamente menos de 15 quilotoneladas equivalentes de dióxido de carbono por ano (Decisão nº 17/CP.7, § 6º, alínea c, item III) e;
- Atividades de florestamento e reflorestamento que devem gerar remoções antrópicas líquidas de GEE por sumidouros inferiores a oito quilotoneladas de dióxido de carbono por ano e que sejam desenvolvidas ou implantadas por comunidades e indivíduos de baixa renda.

Os requisitos de elegibilidade do MDL impostos pelo Protocolo de Quioto a todos os projetos que são submetidos à apreciação da Autoridade Nacional Designada são [61]:

- Participação voluntária;
- Observar a opinião dos integrantes do projeto que deverão sofrer impactos das atividades do projeto;
- Reduzir emissões de GEE de forma adicional em comparação ao que ocorreria na ausência da atividade de projeto;
- Obter aprovação por parte do país onde as atividades serão implantadas;
- Atingir os objetivos de desenvolvimento sustentável definidos pelo país onde as atividades de projeto serão implantadas;
- Não causar impactos colaterais negativos ao meio ambiente local;
- Contabilizar o aumento de emissões de GEE que ocorram fora dos limites das atividades de projeto e que sejam mensuráveis e atribuíveis a essas atividades;
- Proporcionar benefícios mensuráveis, reais e de longo prazo relacionados com a mitigação da mudança do clima; e
- Que o projeto esteja relacionado aos gases e setores definidos no Anexo A do Protocolo de Quioto ou se refiram às atividades de projetos de reflorestamento e florestamento.

8.2 – Créditos de carbono

Créditos de carbono ou Redução Certificada de Emissões (RCE) são certificados emitidos quando ocorre a redução da emissão de gases de efeito estufa ou a captura dos mesmos. O cálculo é feito pela diferença entre as emissões da linha de base e as emissões decorrentes das atividades do projeto de MDL. Nesse cálculo incluem-se também as possíveis fugas. Por convenção, uma tonelada de dióxido de carbono equivalente (t_{CO_2e}) corresponde a um crédito de carbono que pode ser negociado no mercado internacional [8, 65]. O cálculo da quantidade de toneladas de CO_2 ou outros gases seqüestrados ou que tenham as emissões reduzidas é feito por empresas especializadas de acordo com determinação de órgãos técnicos da Organização das Nações Unidas (ONU). A troca de uma tonelada de óleo diesel por biodiesel gera 3,5 toneladas de crédito, um hectare de floresta de eucalipto absorve aproximadamente doze toneladas de gás carbônico por hectare anualmente, um grande aterro sanitário que utilize o metano produzido pela decomposição do material orgânico e o transforme em energia elétrica pode gerar milhões de toneladas de crédito de carbono por ano [60].

Para efeito de cálculos, os créditos de carbono nos Certificados de Emissões Reduzidas são padronizados em toneladas de carbono equivalente. Isso ocorre porque os RCE levam em conta emissões de outros gases de efeito estufa, além do dióxido de carbono, como gás metano, óxido nitroso, perfluorcarbonetos, hidrofluorcarbonetos e hexafluorcarbonetos [66].

Para calcular a quantidade de carbono equivalente, é necessário o conhecimento do poder destrutivo das moléculas de cada gás de efeito estufa. Este poder destrutivo é conhecido como Potencial de Dano Global (*Global Warming Potential* – GWP) e permite saber quanto de efeito estufa foi gerado pela emissão da mesma quantidade de cada um dos gases de efeito estufa [66].

O índice GWP está relacionado à meia-vida de uma mesma quantidade de cada gás, assim como se baseia na eficiência radiativa ou habilidade de absorver o calor. Significa quanto mais ou quanto menos um gás aumenta o efeito estufa, em 100 anos, comparado com a mesma quantidade de CO_2 emitida no mesmo tempo. A molécula de dióxido de carbono tem valor definido como um (1), já a molécula de metano tem valor definido como 21. Isso significa dizer que o metano tem um potencial 21 vezes maior que o dióxido de carbono de causar danos ao meio ambiente, ou seja, emitir 1 kg de metano tem o mesmo efeito que emitir 21 kg de dióxido de carbono [66].

Por definição, 1 kg de CO_2 vale 0,2727 kg de carbono equivalente, já que considera apenas a massa das moléculas de carbono em 1 kg de dióxido de carbono. Para outros gases o cálculo é feito da seguinte forma [66]:

$$\text{Carbono equivalente} = \text{GWP relativo} \times 0,2727$$

Portanto, pode-se verificar que 1 kg de CH₄ equivale a 5,7267 kg de carbono equivalente [66].

8.3 – Mercado de carbono no Brasil e no mundo

Segundo informações do Banco Mundial, em 2004, o mercado de carbono movimentou cerca de 1 bilhão de dólares, já em 2006 o volume de créditos comercializados gerou algo em torno de 30 bilhões de dólares [63]. Cada tonelada de carbono em agosto de 2006 era cotada entre 15 e 18 euros, enquanto que em agosto de 2005 era cotada em 5 euros. Quando a obrigatoriedade de redução de 5,2% nas emissões dos GEE entrar em vigor, no período entre 2008 e 2012, o valor deve atingir valores entre 30 e 40 euros [60].

O Brasil ocupa a terceira posição em termos de reduções de emissões projetadas para o primeiro período de obtenção de créditos, sendo responsável pela redução de aproximadamente 322 milhões toneladas de carbono equivalente, o que corresponde a algo em torno de 6% do total mundial, possuindo 255 projetos de MDL e 66 já com certificação. Em primeiro lugar vem a China com aproximadamente 2,305 bilhões toneladas de carbono equivalente a serem reduzidas (33 a 46% do total mundial), com 1.413 projetos, seguida pela Índia com 1,199 bilhões toneladas de carbono equivalente (14,75 a 24% do total mundial), com 1.118 projetos, como pode ser observado nas Figuras 10, 11e 12 [6, 60, 63, 64].

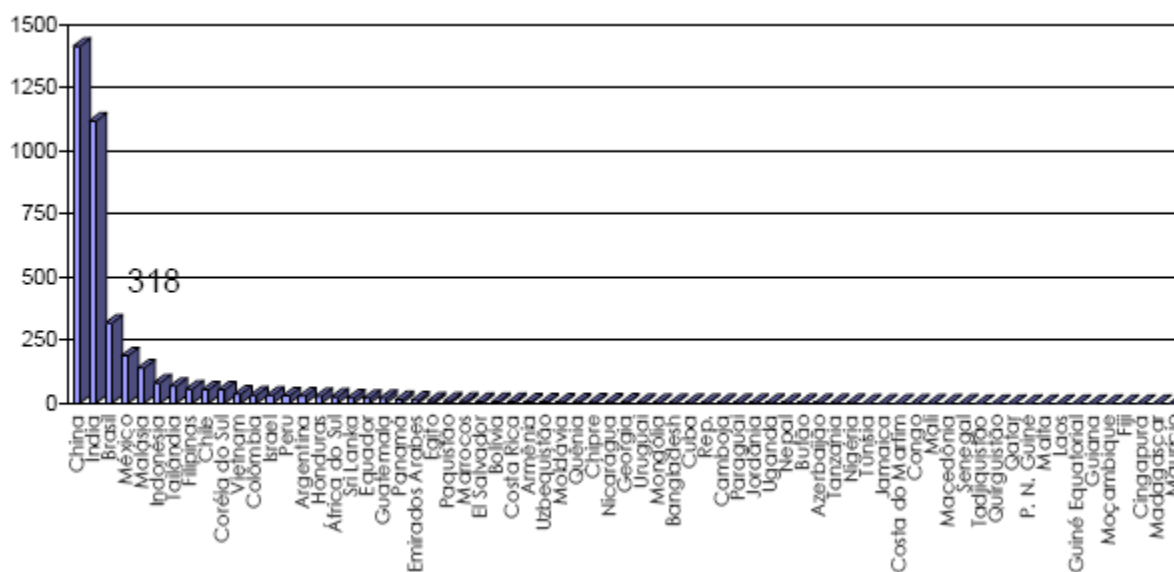


Figura 10 – Número de Atividades de Projeto do MDL [64].

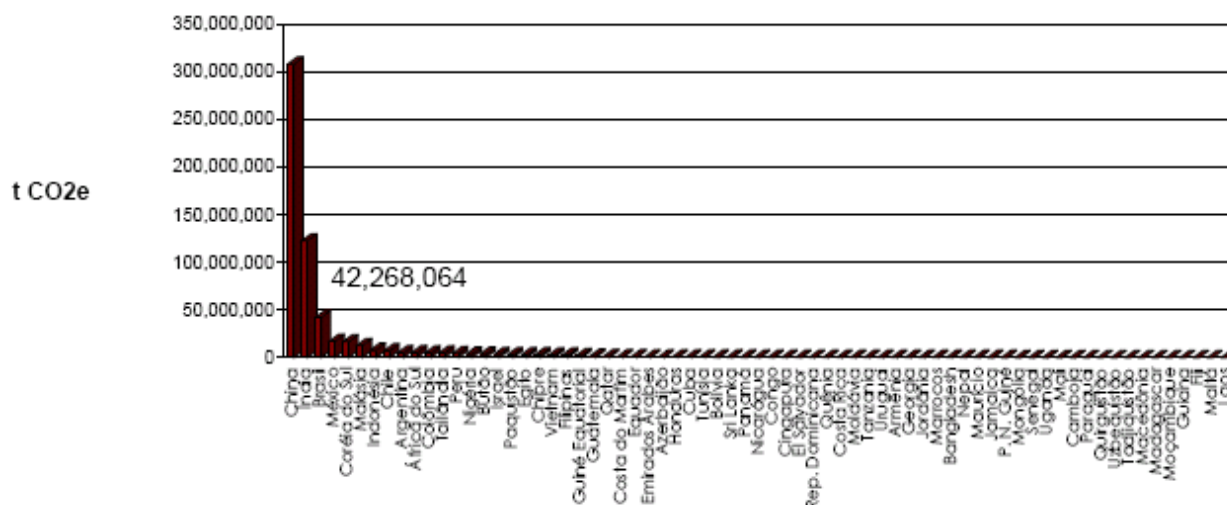


Figura 13 – Reduções de emissões anuais (tCO₂e) [64].

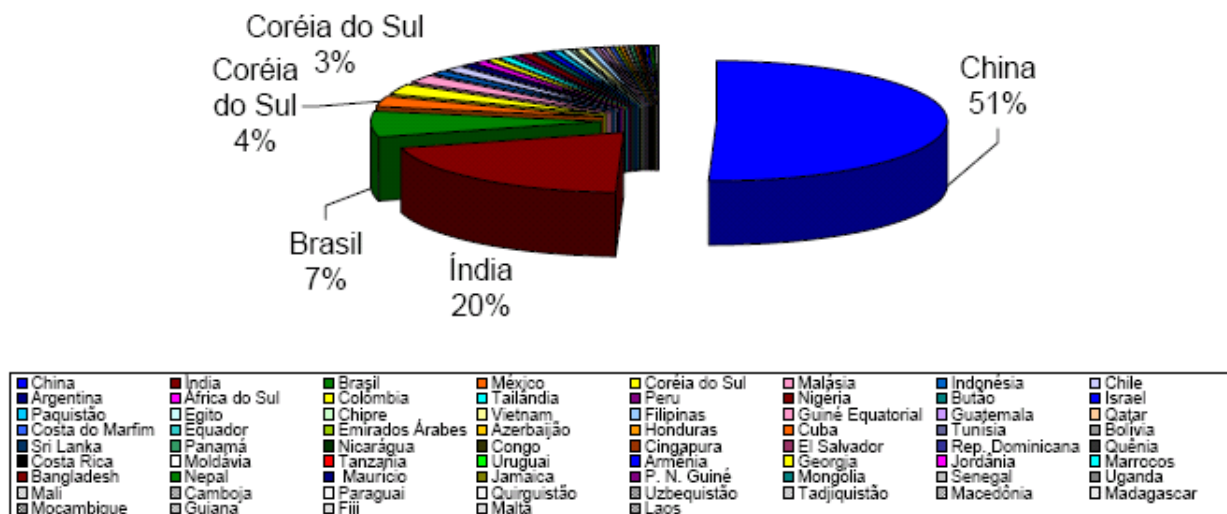


Figura 14 – Reduções de emissões anuais projetadas para o primeiro período de obtenção de créditos [64].

No âmbito nacional podem-se destacar os estados de São Paulo e Minas Gerais com 21% e 14%, respectivamente, do número total de atividades de projetos de MDL como observado na Figura 15.

Essa possibilidade visa tornar a implantação do projeto de tratamento anaeróbio dos dejetos e geração de energia elétrica a partir da queima do biogás mais atrativa com a comercialização dos créditos gerados que podem ajudar no abatimento do custo inicial do projeto.

Para isso, analisaram-se quatro composições do biogás gerado. Duas com a menor produção de biogás diária ($172,9 \text{ m}^3$) com concentração de metano de 50 e 80% em volume, e outras duas com a maior produção de biogás diária ($239,4 \text{ m}^3$) também com concentração de metano de 50 e 80% em volume.

Sendo 1 kg de dióxido de carbono equivalente a 0,2727 kg de carbono equivalente, 1 kg de metano equivalente a 5,7267 kg de carbono equivalente e um crédito de carbono equivalente a uma tonelada de carbono equivalente, pode-se estimar a quantidade de créditos de carbono:

(a) Volume mínimo de gás produzido diariamente ($172,9 \text{ m}^3$) com 50% vol. de metano na mistura:

$$m_{\text{CO}_2} = 155,58 \text{ kg} \rightarrow \text{Carbono equivalente (CO}_2\text{)} = 42,42 \text{ kg}$$

$$m_{\text{CH}_4} = 56,70 \text{ kg} \rightarrow \text{Carbono equivalente (CH}_4\text{)} = 324,7 \text{ kg}$$

$$\text{Crédito de carbono equivalente} = 0,3671$$

(b) Volume mínimo de gás produzido diariamente ($172,9 \text{ m}^3$) com 80% vol. de metano na mistura:

$$m_{\text{CO}_2} = 62,23 \text{ kg} \rightarrow \text{Carbono equivalente (CO}_2\text{)} = 16,97 \text{ kg}$$

$$m_{\text{CH}_4} = 90,73 \text{ kg} \rightarrow \text{Carbono equivalente (CH}_4\text{)} = 519,58 \text{ kg}$$

$$\text{Crédito de carbono equivalente} = 0,5365$$

(c) Volume mínimo de gás produzido diariamente ($239,40 \text{ m}^3$) com 50% vol. de metano na mistura:

$$m_{\text{CO}_2} = 215,43 \text{ kg} \rightarrow \text{Carbono equivalente (CO}_2\text{)} = 58,74 \text{ kg}$$

$$m_{\text{CH}_4} = 78,51 \text{ kg} \rightarrow \text{Carbono equivalente (CH}_4\text{)} = 449,60 \text{ kg}$$

$$\text{Crédito de carbono equivalente} = 0,5083$$

(d) Volume mínimo de gás produzido diariamente ($239,4 \text{ m}^3$) com 80% vol. de metano na mistura:

$$m_{\text{CO}_2} = 86,17 \text{ kg} \rightarrow \text{Carbono equivalente (CO}_2\text{)} = 23,50 \text{ kg}$$

$$m_{\text{CH}_4} = 125,62 \text{ kg} \rightarrow \text{Carbono equivalente (CH}_4\text{)} = 719,38 \text{ kg}$$

$$\text{Crédito de carbono equivalente} = 0,7428$$

Se todo o biogás gerado for utilizado na geração de energia elétrica e o gás de exaustão do gerador for tratado e com isso se conseguir reduzir a emissão de dióxido de carbono e metano para a atmosfera quase a zero, pode-se estimar que aproximadamente 88 toneladas de carbono equivalente (caso (a)) e 178

toneladas (caso (d)) deixariam de ser lançadas na atmosfera anualmente, levando-se em conta que o sistema funcione 20 dias por mês.

Se somente o metano for alvo do projeto de redução de emissão de gás de efeito estufa, pode-se estimar uma redução entre 77,93 toneladas, caso (a), e 172,65 toneladas, caso (d), de carbono equivalente que deixariam de ser lançadas na atmosfera anualmente.

Levando-se em conta que um projeto de MDL pode ter a duração de 10 anos ou ter duração de sete anos, para o primeiro período, e a possibilidade de mais duas prorrogações de sete anos cada, totalizando 21 anos, pode-se estimar o valor monetário gerado pelo projeto de MDL para os dois períodos.

No último leilão realizado pela BM&F BOVESPA (27 jul. 2007), os créditos de carbono foram negociados a 19,20 Euros. Levando-se em conta que a cotação do Euro era de R\$ 3,463, para a compra, e de R\$ 3,466, para venda, pode-se realizar algumas projeções para alguns panoramas futuros [62, 68].

Para o caso (a), num projeto de MDL com duração de 10 anos, as reduções certificadas gerariam algo em torno de 779,30 tCO₂e (tonelada equivalente de carbono) ou R\$ 51.769,13, levando somente o metano em consideração. Se para o mesmo caso fosse utilizado o período inicial de sete anos e mais duas prorrogações, totalizando 21 anos de duração do projeto de MDL, as reduções gerariam algo em torno de 1.636,49 tCO₂e ou R\$ 108.715,17, também levando somente em consideração a utilização do metano.

Para o caso (d), num projeto de MDL com duração de 10 anos, as reduções certificadas gerariam algo em torno de 1.726,51 tCO₂e ou R\$ 114.695,64, levando somente o metano em consideração. Se para o mesmo caso fosse utilizado o período inicial de sete anos e mais duas prorrogações, totalizando 21 anos de duração do projeto de MDL, as reduções gerariam algo em torno de 3.625,67 tCO₂e ou R\$ 240.860,85, também levando somente em consideração a utilização do metano.

Como a cidade de Lupércio (SP) encontra-se a uma altitude de 680 m e possui clima Cwa (clima subtropical com verões quentes e inverno seco), de acordo com a classificação de Koppen, tem temperatura média anual de aproximadamente 21,2°C [69], como apresentado na Tabela 15, pode-se supor que a concentração de metano na mistura gasosa do biogás é de aproximadamente 70% vol., sendo uma boa aproximação. Segundo Massé e Masse [44], quando do estudo da influência da temperatura no tratamento de resíduos de abatedouros, a concentração de metano era de aproximadamente 74,7% vol. à 20°C e de aproximadamente 78,2% vol. à 30°C.

Tabela 15 – Temperatura da região de Lupércio

Temperatura do ar (°C)			
Mês	Mínima média	Máxima média	Média
Janeiro	18,2	29,3	23,8
Fevereiro	18,4	29,4	23,9
Março	17,6	29,1	23,4
Abril	15,0	27,5	21,2
Mai	12,3	25,6	19,0
Junho	10,9	24,5	17,7
Julho	10,3	24,7	17,5
Agosto	11,7	26,8	19,3
Setembro	13,7	27,9	20,8
Outubro	15,4	28,3	21,9
Novembro	16,3	28,7	22,5
Dezembro	17,5	28,6	23,1

Fonte: CEPAGRI (adaptado) [69].

Utilizando um valor de 70% vol. para a concentração de metano na mistura gasosa (172,9 m³) do biogás, pode-se estimar que para um projeto de MDL com período de 10 anos seriam geradas 1.091,00 tCO₂e ou R\$ 72.486,00. Para o período de sete anos renováveis, pode-se estimar que fossem gerados 2.291,00 tCO₂e ou R\$ 152.217,00. Para ambos os casos o valor de cada crédito de carbono foi considerado sendo de 19,20 Euros, e cada Euro cotado a R\$ 3,46. Já para o caso da maior produção de biogás (239,4 m³), com a concentração de 70% vol. de metano, os valores seriam de 1.530,26 tCO₂e (período de 10 anos) e 3.213,55 tCO₂e (período de sete anos com duas renovações), o que daria algo aproximado a R\$ 101.658,23 e R\$ 213.482,55, respectivamente.

Caso o valor dos créditos de carbono atinja o valor de 30 a 40 Euros (cada Euro valendo R\$ 3,46) nos próximos leilões como o mercado de crédito de carbono espera, e se a cotação do Euro frente ao Real se mantiver, o projeto de MDL se torna mais atrativo do ponto de vista financeiro.

Para as reduções com concentração de metano de 70% vol. na mistura gasosa (172,9 m³), ao valor de 30 Euros por tCO₂e, poder-se-ia esperar um valor entre R\$ 113.257,00, para o período de 10 anos, ou R\$ 237.840,00, para o período de sete anos renováveis. Caso as reduções fossem negociadas a 40 Euros por tCO₂e, poder-se-ia esperar um valor entre R\$ 151.010,00, para o período de 10 anos, ou R\$ 317.120,00, para o período de sete anos renováveis. Já para o caso da maior produção de biogás diária (239,40 m³), os valores seriam de R\$ 158.8401,00 (período de 10 anos) e R\$ 333.566,50 (período de sete anos com duas renovações), com os créditos negociados a 30 Euros, e R\$ 211.788,00 (período de 10 anos) e R\$ 444.755,32 (período de sete anos com duas renovações), com os créditos negociados a 40 Euros.

Por uma rápida análise fica claro que o período de sete anos renováveis, totalizando 21 anos, gera mais créditos de carbono. Mas, esse ponto merece ponderações, já que quando de cada renovação do período de obtenção dos créditos, uma Entidade Operacional Designada deverá informar ao Conselho

Executivo do MDL se a metodologia utilizada para o cálculo da linha de base permanece a mesma ou se deve haver um novo ajuste para as características do projeto. Isso pode levar à escolha do período de 10 anos não renováveis caso a linha de base para o período de sete anos renováveis apresente valores mais elevados para os períodos subsequentes, reduzindo os créditos de carbono pretendido pelo projeto de MDL.

Analisando o exposto acima, fica evidente que quanto maior o volume de biogás gerado diariamente e quanto maior os valores de negociação dos créditos de carbono, mais atrativo se tornam os créditos de carbono. Mas se observa que para uma negociação direta na bolsa de valores esses números são pequenos, o que implica em inviabilidade da negociação.

O que pode ser feito e que está sendo utilizado em muitos casos, principalmente nas granjas produtoras de suínos na região sul do Brasil, é a parceria entre empresas especializadas na venda de créditos de carbono e os produtores ou donos de potenciais projetos de MDL. Essas empresas especializadas instalam todos os equipamentos necessários, biodigestor e geradores, a um custo zero para o produtor, que ainda pode usar a energia gerada sem pagar pela mesma, mas exigem em contrapartida o direito de posse dos créditos de carbono gerados, que depois são reunidos em um único pacote para posterior venda ou negociação em leilões.

Então, no caso do abatedouro, é interessante a parceria com uma empresa especializada, em que a mesma pode fornecer os equipamentos necessários e em contrapartida ficar com o direito de posse dos créditos gerados. Mas para que essa parceria seja atrativa, fica claro que a produção de biogás deva ser de 240 m³ de biogás ao dia ou superior, que o período do projeto seja de 21 anos e que os créditos de carbono seja negociados a um valor mínimo de 30 Euros.

9 – Conclusões

Na atualidade, com os problemas de mudanças globais do clima enfrentados pela humanidade, cada vez mais os governos, as autoridades e órgãos competentes estão elaborando leis e fiscalizando sua imposição e cumprimento.

No estado de São Paulo, a fiscalização, imposição das leis e verificação do seu cumprimento são de responsabilidade da Companhia de Tecnologia e Saneamento Ambiental (CETESB), que vem fazendo cumprir rigorosamente as leis ambientais. Tais leis recaem sobre abatedouros e frigoríficos por representarem uma atividade que consome grande quantidade de água ao longo do processo de industrialização da carne, além de gerarem grande quantidade de efluentes com alta carga orgânica que, caso despejados diretamente nos corpos d'águas, podem representar a sua morte. Diante disso, abatedouros e frigoríficos são indústrias que necessitam de instalações que façam o tratamento de todo o efluente produzido antes do seu lançamento nos corpos d'água.

Então, se ao invés de optar pela instalação de uma estação de tratamento de efluentes for realizada a instalação de um biodigestor que fará a estabilização do efluente produzindo biogás e biofertilizante, a indústria de abate obterá algumas vantagens financeiras.

No caso em análise, a produção de biogás e sua possível utilização para a geração de energia elétrica mostram que mesmo o volume de biogás produzido sendo pequeno o investimento em equipamentos, mais especificamente aquisição dos grupos geradores, e em aquisição de materiais para a construção do biodigestor, desde materiais de alvenaria até a manta de vinil, os gastos totalizariam aproximadamente R\$ 61.822,08.

Analizando as possibilidades econômicas geradas por esse empreendimento, pode-se notar a economia proporcionada pela autoprodução de parte da energia elétrica utilizada nas instalações da indústria e pela comercialização do biofertilizante produzido ao final do processo de fermentação dos dejetos do abatedouro.

Considerando os menores índices, que representam o menor número de animais abatidos ao dia (65 animais ao dia, março de 2008), nota-se que com a autogeração de energia elétrica seria proporcionada uma receita de R\$ 3.164,20 ao mês e que com a venda do biofertilizante seria gerada uma receita de R\$ 2.982,50 ao mês (R\$ 30/tonelada), totalizando um faturamento aproximado de R\$ 6.146,70 ao mês. Como a venda do biofertilizante muitas vezes é dificultada pela falta de informação, acaba sendo mais viável sua doação para que o afluente do biodigestor seja consumido rapidamente de forma a não trazer gastos à operação do biodigestor. Então, somente com a receita gerada pela geração de energia elétrica, o tempo de retorno do investimento, ou período de retorno descontado, seria de aproximadamente 3,8 anos (46 meses).

Levando em consideração os maiores índices, que representam o maior número de animais abatidos ao dia (90 animais ao dia, dezembro de 2007), nota-se que com a autogeração de energia elétrica seria proporcionada uma receita de R\$ 3.717,15 ao mês, sendo o tempo de retorno do investimento, ou período de retorno descontado, de 3,24 anos (40 meses). A venda o biofertilizante poderia gerar uma receita de R\$ 4.067,50 ao mês (R\$ 30/tonelada).

Levando-se em consideração que os equipamentos podem ter suas vidas úteis estimadas em 20 anos, desde que executadas as devidas manutenções preventivas e corretivas, e descontados os períodos de retorno do investimento (período de retorno descontado) e os gastos com as manutenções, pode-se prever uma receita de R\$ 575.054,80, relacionada ao menor volume de biogás disponível, e R\$ 694.430,00, relacionada ao maior volume de biogás disponível, para o período estimado de 20 anos.

Havendo a possibilidade de inclusão do projeto na categoria de Mecanismo de Desenvolvimento Limpo uma empresa especializada no mercado de carbono poderia entrar como parceira neste projeto. A empresa seria responsável pelos trâmites legais, pela instalação do biodigestor e do grupo gerador e em contra partida passaria a ser proprietária dos créditos de carbono gerados, dessa forma o abatedouro não teria gasto com a instalação do sistema. Essa possibilidade deve ser estudada, mas não deve nortear o projeto uma vez que o mercado de carbono ainda não está definido e consolidado em sua totalidade e também porque os valores de comercialização variam com a cotação das moedas estrangeiras, fortemente dependentes da conjuntura econômica mundial, o que em alguns casos pode gerar receita menor do que o valor investido no projeto.

Referências Bibliográficas

- [1] Coldebella, A.; Souza, S. N. M.; Souza, J.; Koheler, A. C. **Viabilidade da cogeração de energia elétrica com biogás da bovinocultura de leite**. AGRENER, 2006.
- [2] Goldemberg, J; Villanueva, L. D. **Energia, Meio Ambiente & Desenvolvimento**. São Paulo: Editora da Universidade de São Paulo, 2. ed. rev., 2003, 226 p.
- [3] Coelho, S. T.; Velázquez, S. M. S. G.; Silva, O. C.; Abreu, F. C. **Geração de Energia Elétrica a partir do Biogás Proveniente do Tratamento de Esgoto Utilizando um Grupo Gerador de 18 kW**. V Congresso Brasileiro de Planejamento Energético, 31 de maio a 2 julho de 2006, Brasília – DF.
- [4] Lopes, I. V. **O Mecanismo de Desenvolvimento Limpo – MDL: guia de orientação**. Rio de Janeiro: Fundação Getúlio Vargas, 2002, 90 p.
- [5] Nogueira, J. L. M. **Desenvolvimento limpo e o mercado de carbono**. Disponível em www.pucminas.br/conjuntura. Acessado em 20 nov. 2008.
- [6] Sabbag, B. K. **O Protocolo de Quioto e seus Créditos de Carbono: Manual Jurídico Brasileiro de Mecanismo de Desenvolvimento Limpo**. São Paulo: LTr, 2008, 103 p.
- [7] Beux, S. **Avaliação do tratamento de efluentes de abatedouro em biodigestores anaeróbios de duas fases**. 2005. 99 p. Dissertação de Mestrado em Ciências e Tecnologia de Alimentos – UEPG/PR, Universidade Estadual de Ponta Grossa, Ponta Grossa.
- [8] Centro de Gestão e Estudos Estratégicos. **Manual de Capacitação sobre Mudança do Clima e Projetos de Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL)**. Brasília, DF: 2008, 276 p.
- [9] Gryscek, J. M.; Belo, F. R. **Produção e uso do gás metano na agricultura e agro-indústria**. Piracicaba, 1983.
- [10] Craveiro, A. M. **Considerações sobre projetos de plantas de biodigestão – Digestão anaeróbia e aspectos teóricos e práticos**. I Simpósio Latino-Americano sobre Produção de Biogás a partir de Resíduos Orgânicos, São Paulo, dezembro de 1982.
- [11] Oliveira, L. R. P., **Biodigestor**. Seminários Técnicos de Suinocultura, VII Simpósio Goiano de Avicultura e II Simpósio Goiano de Suinocultura. 13 a 15 de setembro de 2005, Goiânia, Goiás.
- [12] Mazzucchi, O. A. J. **Biodigestor rural**. São Paulo, CESP, 1980. 29p.
- [13] Parchen, C. A. **Manual de biogás**. Curitiba, EMATER-Paraná, 1979.
- [14] Silveira, O. **Biodigestor. Solução energética para o campo**. São Paulo, Secretaria de Ciência: Família Cristã, jul. 1981.
- [15] Barrera, P. **Biodigestores: energia, fertilidade e saneamento para a zona rural**. 2. ed. São Paulo: Ícone, 2003, 106 p.

- [16] CENBIO. **Medidas Mitigadoras para a Redução de Emissões de Gases de Efeito Estufa na Geração Termelétrica**. Brasília, 2000, 222 p.
- [17] Hobson, P. N.; Wheatley, A. D. **Anaerobic digestion: modern theory and practice**. Elsevier Applied Science, 1993. 269p.
- [18] Seghezzo, L.; Zeeman, G.; Lier, J. B.; Hamelers, H. V. M.; Lettinga, G. A. Review : The anaerobic treatment of sewage in UASB and EGSB reactors. **Bioresource technology**. v. 65, p.175-190, 1998.
- [19] Vitoratto, E. **Tratamento de efluentes líquidos orgânicos-Sistemas anaeróbios**.
- [20] Filho, J. A. C. **Biogás, independência energética do Pantanal Mato-grossense**. Circular técnica nº. 9. Corumbá, EMBRAPA, 1981. 53p.
- [21] Deganuttil, R.; Palhaci, M. C. J. P.; Rossi, M.; Tavares, R.; dos Santos, C. **Biodigestores rurais: modelo indiano, chinês e batelada**. Departamento de Artes e Representação Gráfica, FAAC - Faculdade de Arquitetura, Artes e Comunicação, UNESP - Universidade Estadual Paulista Julio de Mesquita Filho, Bauru.
- [22] Alves, S. M.; Melo, C. F. M.; Wisniewski, A. **Biogás; uma alternativa de energia no meio rural**. Belém, EMBRAPA-CPATU, 1980.
- [23] Souza, J. S. I.; Peixoto, A. M.; Toledo, F. F. **Enciclopédia agrícola brasileira**, v. 1, 508 p. Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”: Edusp, 1995.
- [24] Coelho, S. T.; Velázquez, S. M. S. G.; Silva, O. C.; Abreu, F. C. **A conversão da fonte renovável biogás em energia**. V Congresso Brasileiro de Planejamento Energético, 31 de maio a 2 julho de 2006, Brasília – DF.
- [25] Ribeiro, W. X. **Comparação dos parâmetros técnicos de um motor diesel funcionando com óleo diesel e óleo diesel/biogás**. Universidade Federal do Ceará, Centro de Ciências Agrárias, Departamento de Engenharia Agrícola, Fortaleza, 1993.
- [26] Ferraz, J. M. G.; Mariel, I. E. **Biogás, uma fonte alternativa de energia**. Brasil, 1980, 27p.
- [27] Sganzeria, E. **Biodigestor; uma solução**. Agropecuária, Porto Alegre, 1983.
- [28] Nogueira, L. A. H. **Biodigestão: A alternativa energética**. São Paulo, Nobel, 1986.
- [29] Santos, P. **Guia Técnico de Biogás**. CCE – Centro para a Conservação de Energia, Portugal, 2000.
- [30] Konzen, E. A., **Dejetos de suínos fermentados em biodigestores e seu impacto ambiental como insumo agrícola**. Seminários Técnicos de Suinocultura, VII Simpósio Goiano de Avicultura e II Simpósio Goiano de Suinocultura. 13 a 15 de setembro de 2005, Goiânia, Goiás.
- [31] Costa, D. F. **Geração de energia elétrica a partir do biogás de tratamento de esgoto**. São Paulo, 2006. 194p. Dissertação de mestrado (Programa Interunidades de Pós-Graduação em Energia – IEE / EPUSP / FEA / IF), Universidade de São Paulo.

- [32] Decreto Nº 8.468, de 8 de Setembro de 1976. Disponível em: <www.cetesb.sp.gov.br/Servicos/licenciamento/postos/legislacao/Decreto_Estadual_8468_76.pdf>. Acesso em 20 jan. 2008.
- [33] 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, p. 27-36, 2002.
- [34] Souza, M. E. Fatores que influenciam a digestão anaeróbia. **Revista DAE**. v. 44, p. 88-94, 1984.
- [35] Viñas, M.; Martinez, J.; Baselli, B. Advantages of an anaerobic reactor for TMP wastewater with separated acidogenic and methanogenic stages. **Environmental Technology**. v. 14, p. 995-1000, 1993.
- [36] Garcia, J. L.; Patel, B. K. C.; Olliver, B. Taxonomic, phylogenetic, and ecological diversity of methanogenic *Archae*. **Anaerobe**. v. 6, p. 205-226, 2000.
- [37] Veeken, A.; Hamelers, B. Effect of temperature on hydrolysis rates of selected biowaste components. **Bioresource Technology**. v. 69, p. 249-254, 1999.
- [38] CHERNICHARO, C. A. de L. **Princípios do tratamento biológico de águas residuárias: reatores anaeróbios**. Belo Horizonte: Segrac, 1997, v. 5. 245 p.
- [39] Metcalf, A.; Eddy, M. S. **Wastewater engineering: treatment and reuse**. 4. ed. New York: McGraw-Hill, 2003. 1819p.
- [40] Sachs, J. von; Meyer, U.; RYS, P.; Feitkenhauer, H. New approach to control the methanogenic reactor of a two phase anaerobic digestion system. **Water Research**. v. 37, n. 5, p. 973-982, 2003
- [41] SOLERA, R.; ROMERO, L. I.; SALES, D. The evolution of microorganisms in a thermophilic anaerobic reactor. In: LATIN AMERICAN WORKSHOP AND SYMPOSIUM ON ANAEROBIC DIGESTION, VII, 2002, México: Mérida. **ANAIS...** Mérida: UNAM, 2002. p.29-34.
- [42] McCarty, P. L.; Mosey, F. E. Modelling of anaerobic digestion processes (a discussion of concepts). **Water Science and Technology**. v. 24, p.17-33, 1991.
- [43] Murto, M.; Bjornsson, L.; Mattiasson, B. Impact of food industrial waste on anaerobic co-digestion of sewage sludge and pig manure. **Journal of Environmental Management**. v.70, p.101-107, 2004.
- [44] Massé, D. I.; Masse, L. The effect of temperature on slaughterhouse wastewater treatment in anaerobic sequencing batch reactors. **Bioresource Technology**. v.76, p. 91-98, 2001.
- [45] LUCAS JÚNIOR, J. **Estudo comparativo de biodigestores modelos Indiano e Chinês**. Botucatu, 1987, 114 p. (Tese de Doutorado), Universidade Estadual Paulista
- [46] Oliveira, P. A. V.; Higarashi, M. M. **Geração e utilização de biogás em unidades de produção de suínos**. Concórdia: Embrapa Suínos e Aves, 2006,42p.
- [47] **Manual de Biodigestão**. Disponível em <www.winrock.org.br>. Acesso em 31 jan. 2009.
- [48] **O Biodigestor**. Disponível em <www.iengep.com.br/biodigestores.htm>. Acesso em 7 fev. 2009.

- [49] Pacheco, J. W.; Yamanaka, H. T. **Guia técnico ambiental de abates (bovino e suíno) – série P+L**. São Paulo, CETESB, 2006.
- [50] Atkins, P. **Princípios de química: questionando a vida moderna e o meio ambiente**/ Peter Atkins e Loretta Jones; trad. Ignez Caracelli... [et al.]. – Porto Alegre: Bookman, 2001.
- [51] Santos, P. **Guia técnico de biogás**. CCE - Centro para Conservação de Energia, Portugal, 2000.
- [52] E-Mail: Souza, J. **Publicação eletrônica** [mensagem pessoal]. Mensagem recebida por <biogasmotores> em 20 dez. 2008.
- [53] **CATÁLOGO DE PEÇAS/MOTORES**. Agosto de 2007, Cia. Caetano Branco. Disponível em <http://www.branco.com.br/website/p_lb_b4t5000.htm>. Acesso em 27 set. 2007.
- [54] Santos, C. B.; Sauer, I. L. **Sumario metodológico do estudo de planejamento integrado de recursos para o sistema elétrico de Boa Vista – RR**. São Paulo, IEE-USP, 1998.
- [55] CMN – Conselho Monetário Nacional. Disponível em <www.fazenda.gov.br>. Acesso em 8 jul. 2009.
- [56] Costa, H. S.; Costa, R. A. L. **Análise comparativa econômica entre diferentes opções para a eletrificação domiciliar rural**. Revista Econômica do Nordeste, v. 31, n. 3, p. 320-328, Fortaleza, jul. - set. 2000.
- [57] Sgarbieri, V. C. **Proteínas em alimentos protéicos**. São Paulo: Varela, 1996. 517 p.
- [58] Massaro, A. F.; Pinto, L. A. A. Enriquecimento protéico de farelo de arroz desengordurado, com sangue bovino, utilizando a técnica de leite de jorro. **Revista do Instituto Adolfo Lutz**, São Paulo, v. 61, n. 2, p. 77-84, 2002.
- [59] Disponível em <www.mfrural.com.br>. Acesso em: 7 fev. 2009.
- [60] Brasil tem potencial para o mercado de CO₂. **Revista da Madeira**, n. 102, jan. de 2007. Disponível em www.remade.com.br, acessado em 5 dez. 2008.
- [61] Sister, G. **Mercado de carbono e Protocolo de Quioto**. 2 ed. – Rio de Janeiro: Elsevier, 2008. 200 p. – (Jurídica).
- [62] UOL Economia Cotações. Disponível em <<http://economia.uol.com.br/cotacoes/>>. Acesso em 18 dez. 2008.
- [63] Mercado de carbono estimula setor florestal. **Revista da Madeira**, n. 112, Abr. de 2008. Disponível em www.remade.com.br, acessado em 20 nov. 2008.
- [64] Status atual das atividades de projetos no âmbito do Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL) no Brasil e no Mundo (Última compilação do site da CQNUMC: 30 de setembro de 2008). Disponível em <http://www.mct.gov.br/upd_blob/0026/26985.pdf> Acesso em: 27 dez. 2008.
- [65] Fonte limpa de energia. **Revista da Madeira**, n. 114, Jun. de 2008. Disponível em www.remade.com.br, acessado em 20 nov. 2008.

- [66] Signorini, P. O que é carbono equivalente? Rastro de Carbono, 28 nov. 2007. Disponível em: <<http://lablogatorios.com.br/rastrodecarbono/?p=588>>. Acesso em: 14 dez. 2008.
- [67] *Consideration of commitments for subsequent periods for parties included in annex I to the convention under article 3, paragraph 9 of the Kyoto protocol*. Disponível em www.unfccc.int/files/meetings/cop_11/application/pdf/cmp1_00_consideration_of_commitments_under_3.9.pdf. Acessado em 28 jul. 2006.
- [68] BM&F BOVESPA (Bolsa de Mercadorias e Futuros/BOVESPA). Disponível em <<http://www.bovespa.com.br/leiloes/formDefault.asp?strCodLeilao=CERB001D&strIdioma=pt-BR>>. Acesso em 18 dez. 2008.
- [69] Clima dos Municípios Paulistas: banco de dados preparado por Mariana J. de Miranda, Hilton S. Pinto, Jurandir Z. Júnior, Rosana M. Fagundes, Daniela B. Fonsechi, Leandro Calve e Giampaolo Q. Pellegrino. In: CENTRO DE PESQUISAS METEOROLÓGICAS E CLIMÁTICAS APLICADAS A AGRICULTURA (CEPAGRI). Disponível em: <http://www.cpa.unicamp.br/outras-informacoes/clima_muni_316.html>. Acesso em: 30 dez. 2008.