

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE MINAS GERAIS
BACHARELADO EM ENGENHARIA ELÉTRICA
LARISSA SOARES FIGUEIREDO

ANÁLISE DA VIABILIDADE DO USO DE BIODIGESTORES EM
PROPRIEDADES RURAIS

FORMIGA - MG
2017

LARISSA SOARES FIGUEIREDO

**ANÁLISE DA VIABILIDADE DO USO DE BIODIGESTORES EM
PROPRIEDADES RURAIS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia Elétrica pelo Instituto Federal de Minas Gerais como requisito parcial para obtenção do título de bacharel em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof.Dr. Renan Souza Moura.

FORMIGA - MG

2017

LARISSA SOARES FIGUEIREDO

**ANÁLISE DA VIABILIDADE DO USO DE BIODIGESTORES EM
PROPRIEDADES RURAIS**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao Instituto Federal Campus
Formiga, como requisito parcial para
obtenção do título de Bacharel em
Engenharia Elétrica.

Avaliado em: ____ de _____ de _____.

Nota: _____

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Renan Souza Moura

Prof. Dr. Ricardo Carrasco Carpio
Avaliador

Eng. Civil Salomão Chicre Silva
Avaliador

Dedico este trabalho a minha família, em especial aos meus pais, que sempre estiveram presentes, me apoiando em todas as dificuldades.

AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente, a Deus, por ter me dado sabedoria, paciência e acima de tudo por estar comigo em todas as dificuldades, ajudando-me a superá-las. Sem Ele nada seria possível.

Agradeço, de forma especial, à minha mãe, Pollyanna Soares de Novaes, e ao meu pai, Allan Darley Figueiredo de Sales, por não medirem esforços para que eu pudesse levar meus estudos adiante.

Aos meus irmãos, Allan, Lohana, Luiza e Matheus, pelo apoio e carinho. E a todos os meus familiares e amigos que sempre estiveram comigo.

Agradeço ao meu namorado, Letivan, pela ajuda e apoio durante todo o curso e na realização deste trabalho.

Agradeço ao meu orientador, Prof.Dr. Renan Souza Moura, pela paciência, dedicação e esforço que possibilitaram que eu realizasse este trabalho.

E enfim, a todos que contribuíram para a realização deste trabalho, seja de forma direta ou indireta, muito obrigada.

RESUMO

A agropecuária está em constante crescimento e a intensificação em seus sistemas de produção tem como consequência o aumento das agressões ambientais, decorrente, muitas vezes, dos dejetos de animais, gerando graves problemas. Assim, a estabilização desses dejetos em biodigestores tem merecido destaque, em função dos aspectos sanitários e também como potenciais na geração de energia renovável.

Biodigestores são compartimentos fechados, onde toda biomassa contida em seu interior sofre o processo de fermentação, por meio da atividade de bactérias anaeróbicas. No caso deste trabalho, a biomassa contida no interior dos biodigestores são dejetos de animais, que, após sofrerem o processo de biodigestão anaeróbica, serão transformados em biofertilizante, liberando o biogás.

Este trabalho tem como objetivo o desenvolvimento de um biodigestor como fonte de geração de energia para a fazenda da Chácara, situada no município de Campo Belo- MG, bem como análise de sua viabilidade econômica.

Palavras-chave: Biodigestor. Biogás. Viabilidade econômica.

ABSTRACT

The Agriculture is in constant growing and the intensification of its production systems has as consequence the increase of the environmental aggressions, caused, often due the animal waste, generating severe issues. Thereby, the estabilization of these waste in biodigesters has deserved notoriety, according to the sanitary aspects and also as potential in the generation of renewable energy.

Biodigesters are closed compartments, where all the biomass contained in its interior undergoes the fermentation process through the activity of anaerobic bacteria. In the subject of this work, the biomass contained inside the interior of the biodigester are animal waste, which after undergoing the anaerobic biodigestion process will be transformed into biofertilizers and the biogas will happen to be released.

This work has as goal the development of a biodigester as source of energy generation for the Chácara Farm, located in the municipality of Campo Belo, MG, as well as its economic viability analysis.

Key words: Biodigestor. Biogas. Economic viability.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Evolução da variação de bovinos no Brasil.....	13
Figura 2- Etapas do processo de biodigestão anaeróbia.....	17
Figura 3- Taxa de crescimento das bactérias metanogênicas em relação à temperatura.	18
Figura 4- Biodigestor indiano.....	29
Figura 5- Imagem tridimensional do biodigestor indiano.	30
Figura 6- Imagem tridimensional do biodigestor chinês.....	31
Figura 7- Biodigestor canadense.	32
Figura 8- Biodigestor batelada.	33
Figura 9- Gerador do sítio 1.....	38
Figura 10- Biodigestor situado na fazenda Arapé.....	39
Figura 11- Baía com canaletas.....	40
Figura 12- Gerador do sítio 3.....	40
Figura 13- Comando para a escolha da energia proveniente do gerador ou da concessionária.	41
Figura 14- Dimensões do biodigestor.	45
Figura 15- Dimensões do gasômetro.	46
Figura 16- Altura do tubo de carga e descarga com o fundo da câmara de biodigestão.....	48
Figura 17- Dimensão da parede divisória e da coluna de concreto.	50
Figura 18- Marcação da base de concreto.....	52
Figura 19- Construção da parede da câmara de fermentação.	53
Figura 20- Construção da parede divisória.	54
Figura 21- Parede da câmara de fermentação e parede divisória construída.	54
Figura 22- Sistema de distribuição do biogás.....	55
Figura 23- Biodigestor indiano.....	56
Figura 24- Estrutura realizada para conduzir os dejetos até o biodigestor.....	56

LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Tempo de retenção do esterco bovino, suíno e de aves.	19
Tabela 2- Concentração dos elementos que constituem no biogás.	20
Tabela 3- Equivalência do metro cúbico de biogás com outras fontes energéticas...	21
Tabela 4- Comparação dos motores Ciclo Otto com as Microturbinas.	23
Tabela 5- Quantidade de dejetos que cada animal elimina por dia.	43
Tabela 6- Relação esterco/água de alguns tipos de dejetos.....	43
Tabela 7- Quantidade de diferentes tipos de dejetos para a produção de 1 m ³ de biogás.	47
Tabela 8- Potência dos equipamentos da fazenda da Chácara.	59
Tabela 9- Consumo de energia elétrica da fazenda da Chácara.	60
Tabela 10- Orçamento realizado para a construção do biodigestor.	63
Tabela 11- Índice de inflação.....	64
Tabela 12-Gastos para a construção do biodigestor.....	64
Tabela 13-Economia gerada com a utilização do biodigestor.....	65

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	11
1.1 Problemas.....	12
1.2 Justificativa	12
1.3 Hipótese	13
1.4 Objetivos	14
1.4.1 Objetivo Geral	14
1.4.2 Objetivos específicos	14
1.5 Estrutura do Trabalho	15
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	15
2.1 Biogás	16
2.1.1 Formação do biogás	16
2.1.1.1 Etapas do processo biológico anaeróbico.....	16
2.1.1.2 Parâmetros que afetam a produção do biogás	18
2.1.1.2.1 Temperatura interna do biodigestor	18
2.1.1.2.2 PH.....	19
2.1.1.2.3 Tempo de retenção.....	19
2.1.1.2.4 Nutrientes	19
2.1.1.2.5 Inexistência de ar	20
2.1.2 Características do biogás.....	20
2.1.3 Aplicações do biogás	21
2.1.3.1 Geração de energia elétrica	21
2.1.3.2 Geração de energia térmica	23
2.1.3.3 Combustível para veículos ou Biometano.....	24
2.2 Biofertilizante.....	25
2.3 Biodigestores	26
2.3.1 Breve histórico dos biodigestores.....	26
2.3.2 Biodigestores contínuos	27
2.3.2.1 Biodigestor indiano.....	27
2.3.2.2 Biodigestor chinês.....	30
2.3.2.3 Biodigestor canadense.....	31
2.3.3 Biodigestor descontínuo ou batelada.....	32
2.3.4 Biodigestores no mundo.....	33
2.3.4.1 Alemanha	33

2.3.4.2 Estados Unidos.....	34
2.3.4.3 China.....	35
2.3.4.4 Brasil	35
2.3.4.4.1 Estudo de caso.....	37
2.3.4.4.1.1 Característica da fazenda Arapé.....	37
2.3.4.4.1.2 Visita realizada na fazenda Arapé	37
2.3.4.4.1.2.1 Visita realizada no sítio 1	38
2.3.4.4.1.2.2 Visita realizada no sítio 3	39
3 METODOLOGIA.....	42
3.1 Dimensionamento do biodigestor	42
3.1.1 Dimensionamento da altura, volume e diâmetro da câmara de fermentação	44
3.1.2 Dimensionamento do gasômetro	46
3.1.3 Dimensionamento dos tubos de carga e descarga e do tubo-guia.....	48
3.1.4 Dimensionamento da parede divisória e da coluna de concreto.....	49
3.1.5 Dimensionamento da caixa de carga e da caixa de descarga	50
3.2 Construção do biodigestor	51
3.3 Operação do biodigestor	56
4 RESULTADOS	58
4.1 Quantidade de biogás e biofertilizante produzido no biodigestor.....	58
4.2 Seleção do gerador	59
4.3 Consumo de energia gasto na fazenda da Chácara	60
4.4 Geração de energia elétrica	61
4.5 Análise da viabilidade econômica.....	62
4.5.1 Análise dos investimentos para a construção e operação do biodigestor ..	62
4.5.2 <i>Payback</i>	65
4.5.3 Valor presente líquido (VPL).....	66
4.5.4 Taxa interna de retorno (TIR)	67
5 CONCLUSÃO.....	67
REFERÊNCIAS	69

1 INTRODUÇÃO

A sociedade, em geral, está cada vez mais dependente da energia elétrica, tendo em vista que quase todas as atividades humanas são movidas por algum equipamento que necessita desta energia, seja nas indústrias, comércio, meios de comunicação, de transporte, de lazer, entre outros (MOREAU, 2013). Porém, essa energia, muitas vezes, é advinda de combustíveis fósseis, e, em alguns casos de usinas termelétricas, sendo prejudicial para o meio ambiente, além de apresentar um alto custo.

Hoje, com a ideia de um mundo sustentável, a humanidade vem procurando um meio de produzir energia elétrica de uma forma que não prejudique o meio ambiente, assim, destaca-se as energias renováveis (DE OLIVEIRA, 2014).

O Brasil apresenta bastante recurso para investir em energias renováveis, porém faltam ainda incentivos governamentais. De acordo com a conferência COP21, o Brasil tem como meta alcançar, até 2030, 33% de energia elétrica proveniente de fontes renováveis, como eólica, solar, biomassa, entre outras; desconsiderando as hidrelétricas, que, embora seja proveniente de um recurso natural, causa grande impacto ambiental em sua construção (VIEIRA, 2015).

Dentre as energias renováveis existentes, a proveniente da biomassa é de grande importância para a preservação do meio ambiente. Os resíduos gerados pelas indústrias e os dejetos de animais, por exemplo, quando tratados de forma inadequada contaminam o solo, as águas e contribuem, também, para o aquecimento global. Ao serem lançados no meio ambiente, estes efluentes liberam o gás metano na atmosfera, que é 21 vezes mais poluente que o gás carbônico, no que se refere ao efeito estufa (OLIVEIRA et al, 2009).

O processo de digestão anaeróbica, em biodigestores, torna-se uma opção bem atraente para o tratamento dos resíduos, visto que, com a degradação destes dejetos, ocorre a produção do biogás, que pode ser utilizado como uma fonte para produção de energia elétrica. É importante ressaltar que este processo ainda produz o biofertilizante, que apresenta um alto teor de nutrientes necessários para as lavouras (DE OLIVEIRA, 2013).

O foco deste trabalho é a utilização do biogás como fonte energética, por meio da digestão anaeróbica de dejetos oriundos da atividade pecuária. O único agravante para disseminação dessa fonte de energia é o custo de construção de um

biodigestor, uma vez que os equipamentos necessários para sua instalação apresentam um custo relativamente alto.

1.1 Problemas

Segundo uma pesquisa realizada pela ANEEL, o Brasil apresenta 61,3% da produção de energia elétrica proveniente de usinas hidrelétricas, 17% de combustíveis fósseis, 8,7% da biomassa e 5,9% da eólica (PORTAL BRASIL, 2016). Embora a energia proveniente das usinas hidrelétricas seja considerada renovável, nos últimos anos, ocorreram problemas de escassez de água no Brasil, o que resultou em aumentos na tarifa de energia. Este fato fez com que fossem incorporadas ao sistema elétrico brasileiro algumas usinas termelétricas, as quais apresentam custo elevado para produção de energia elétrica, além de serem altamente poluentes.

Diante deste fato o uso de outras fontes de energia, como a biomassa, torna-se atrativo, apesar do investimento inicial ser relativamente alto. Segundo a Resolução 482/2012 da ANEEL, o consumidor que optar por gerar sua própria energia pagará apenas pela diferença entre a energia consumida e a energia gerada, desta forma, o uso da energia elétrica proveniente do biogás será uma importante fonte de economia. Neste trabalho, será realizado o desenvolvimento de uma análise técnica para implantação de um projeto de biodigestor na Fazenda da Chácara, situada no município de Campo Belo- MG. A energia produzida a partir da digestão anaeróbica dos resíduos de animais será utilizada para substituir a energia proveniente das concessionárias, desta maneira será possível prever a economia gerada pelo biodigestor para o consumidor.

1.2 Justificativa

A agropecuária é um setor com bastante relevância no Brasil. Essa atividade está diretamente ligada à economia do país, chegando a representar 8% do PIB (Produto Interno Bruto) (FREITAS, 2016). Assim, pode-se constatar que o Brasil apresenta uma quantidade significativa de gado, como mostra a Figura 1. Em 2015, segundo dados do IBGE o país chegou a alcançar 215,2 milhões de cabeças, sendo considerado o segundo maior efetivo de bovinos do mundo (CANAL RURAL, 2016).

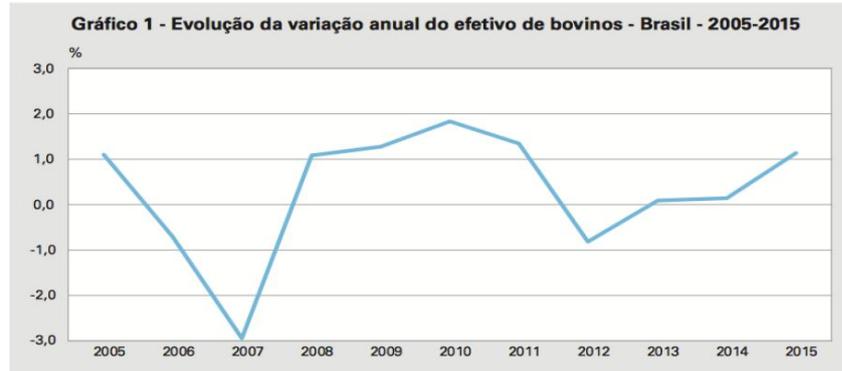


Figura 1- Evolução da variação de bovinos no Brasil.
Fonte: CANAL RURAL, 2016.

Com isso, o Brasil torna-se um dos maiores exportadores de carne bovina, o que é de extrema importância para o setor econômico (CANAL RURAL, 2016). Porém, esta grande quantidade de gado, resulta em uma quantidade mais significativa ainda de dejetos, os quais, como mencionado anteriormente, se forem despejados sem tratamento podem ocasionar sérios danos ao meio ambiente.

Com esta grande quantidade de dejetos, o Brasil teria capacidade de produzir uma quantidade significativa de energia. Toda a energia proveniente da biomassa, gerada a partir de dejetos vegetais ou animais, conseguiria suprir um terço do consumo total da energia brasileira. Caso a energia da biomassa substituísse a energia térmica, os custos de energia iriam reduzir de 10% para 5% (AMCHAM BRASIL, 2016).

Para o desenvolvimento dessa energia, o país necessita de mais investimentos e incentivos por parte do governo. A disseminação desta fonte energética só não é mais popularizada devido ao custo inicial para a instalação dos biodigestores.

1.3 Hipótese

Este presente trabalho relata sobre a importância da construção de biodigestores, tendo como foco a implantação de um projeto de biodigestor na fazenda da Chácara. De acordo com os dados informados pelo proprietário da fazenda, tem-se uma criação de 50 vacas leiteiras e 50 gados de corte. Assim, é feito o seguinte questionamento: com esta quantidade de animais, qual o montante de dejetos produzidos por mês? É possível suprir toda a demanda de energia que a

fazenda consome com esta quantidade? A implantação do biodigestor na fazenda é viável? Caso for viável, qual é a economia que o proprietário terá com a construção deste?

Estas são as hipóteses que serão questionadas durante a realização deste trabalho. Foi realizado um estudo para analisar a viabilidade da construção do biodigestor na fazenda da Chácara. Com a informação da quantidade de animais na fazenda, pôde-se calcular a quantidade de dejetos produzidos, a quantidade de energia que estes produzirão e a rentabilidade do projeto.

1.4 Objetivos

1.4.1 Objetivo Geral

Elaborar o dimensionamento de um biodigestor e verificar a possibilidade de produção de biogás suficiente para suprir toda a demanda de consumo de energia elétrica de uma fazenda. Além de avaliar a viabilidade econômica deste projeto.

1.4.2 Objetivos específicos

Este trabalho apresenta como objetivos específicos os seguintes itens:

- Realização de um estudo de caso na fazenda Arapé, com o intuito de comprovar as vantagens do uso de biodigestores;
- Propor a realização de um biodigestor na fazenda da Chácara, situada no município de Campo Belo-MG;
- Dimensionar todos os componentes para a construção do biodigestor na fazenda da Chácara, como caixa de carga e descarga, gasômetro, câmara de fermentação, tubo de carga e descarga e tubo-guia;
- Avaliar o potencial de geração de energia elétrica do biodigestor projetado, com a finalidade de observar o quanto de energia que este biodigestor conseguirá suprir na fazenda da Chácara;
- Analisar a viabilidade econômica que este projeto proporcionará para o proprietário da fazenda da Chácara, como o VPL, *payback* e o TIR.

1.5 Estrutura do Trabalho

Para um melhor entendimento sobre o assunto, este trabalho é composto por cinco capítulos.

O primeiro capítulo trata-se de uma abordagem geral para introduzir o tema, como a importância das energias renováveis para o mundo, citando os problemas decorrentes do uso das energias convencionais. Em seguida, são enfatizados os prejuízos causados pelo mau manejo dos dejetos de animais nas fazendas, mostrando a importância do uso de biodigestores e justificando, assim, a escolha do tema. Finaliza com a apresentação das hipóteses e os objetivos.

O segundo capítulo mostra os conceitos básicos para entender o funcionamento de um biodigestor, destacando como ocorre a produção de biogás e biofertilizante. Além de relatar como o biogás, subproduto do biodigestor, consegue gerar energia. Para finalizar o capítulo, foi realizado um estudo de caso na fazenda Arapé, com intuito de comprovar a importância e as vantagens de construir biodigestores nas fazendas.

O terceiro capítulo realiza o dimensionamento do projeto de um biodigestor na fazenda da Chácara. Esse dimensionamento só foi possível ser realizado com os dados fornecidos pelo proprietário da fazenda. Depois de realizado o dimensionamento, foi mostrado como funciona a construção e operação deste biodigestor.

O quarto capítulo apresenta o estudo da viabilidade econômica do biodigestor projetado na fazenda da Chácara, levando em consideração o investimento do projeto e o tempo de retorno deste investimento, verificando a sua atratividade.

Por fim, o quinto capítulo, mostra uma conclusão obtida em todas as etapas.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo apresenta uma abordagem geral sobre os principais tipos de biodigestores existentes, dando ênfase nos seus componentes. Além disto, será relatado sobre os subprodutos gerados no biodigestor, no caso, o biogás e o biofertilizante. Serão apresentados, também, alguns projetos de biodigestores em destaque no mundo, mostrando, inclusive, a situação do Brasil em relação a esta tecnologia. E, por fim, para comprovar a viabilidade da construção de um

biodigestor, será abordado nesta seção, um estudo de caso realizado na fazenda Arapé, onde possui dois biodigestores em ação.

2.1 Biogás

A matéria orgânica quando decomposta no meio sofre a ação de bactérias anaeróbicas, ou seja, bactérias que sobrevivem na ausência de oxigênio, ocorrendo, assim, o processo de fermentação, que resulta na produção do biogás. Este processo costuma ocorrer em lagos, pântanos, esterqueiras, entre outros lugares (COLDEBELLA, 2006). Depois da descoberta dos biodigestores, este processo também ocorre no interior desta câmara de fermentação.

2.1.1 Formação do biogás

Como foi dito, o biogás é proveniente da digestão anaeróbica. Este processo de formação do biogás é então dividido em quatro fases: hidrólise, acidogênese, acetogênese e metanogênese.

2.1.1.1 Etapas do processo biológico anaeróbico

- **Hidrólise:** Esta é a primeira etapa do processo de formação do biogás. Ocorre a decomposição dos compostos orgânicos complexos, como proteínas, carboidratos e gorduras em compostos orgânicos simples, por meio da ação de enzimas (ROHSTOFFE, 2010). Somente após esta quebra dos polímeros maiores que começa o processo de biodigestão (PORTAL DO BIOGÁS, 2013).
- **Fase acidogênica:** Nesta etapa ocorre o processo de fermentação. As pequenas moléculas resultantes do processo da hidrólise continuam sendo quebradas, por meio das bactérias fermentativas, em moléculas ainda menores (KARLSSON et al, 2014), como o ácido propanóico, ácido butanóico, ácido láctico e alcoóis, além de hidrogênio e gás carbônico (PORTAL DO BIOGÁS, 2013). A formação desses ácidos depende da concentração de hidrogênio no meio, sendo que quando a taxa de hidrogênio é alta, a eficiência desta etapa é afetada negativamente, pois ocorre um

aumento da fração de ácidos de cadeia mais longa. Já, quando a taxa de hidrogênio é baixa ocorre quase que exclusivamente a formação de ácido acético (ONUUDI, 2014).

- Fase acetogênica: As bactérias acetogênicas convertem os produtos resultantes da acidogênese em ácido acético, hidrogênio e dióxido de carbono. Nesta etapa é preciso manter um equilíbrio da concentração de hidrogênio, pois suas bactérias são inibidas a grandes quantidades deste gás (PORTAL DO BIOGÁS, 2013).
- Fase metanogênica: Esta é a última etapa do processo de formação do biogás. Nesta fase ocorre a produção do metano, que é o principal gás constituinte do biogás, dióxido de carbono e água. Para a formação do metano é necessário principalmente ácido acético e dióxido de carbono, que são produtos resultantes da fase acetogênica. As bactérias metanogênicas pertencem ao grupo ARCHAEA que não são resistentes a alterações no pH. Portanto, para que ocorra a formação do metano é necessário que estas bactérias estejam atuando sob um pH adequado (KARLSSON et al, 2014).

A Figura 2 ilustra estas etapas que as matérias orgânicas passam até a formação do biogás.

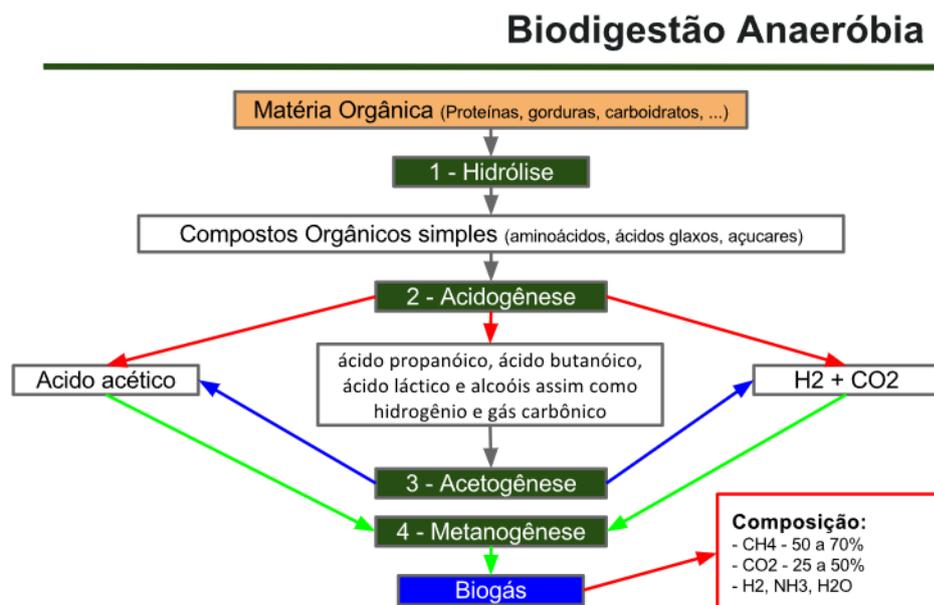


Figura 2- Etapas do processo de biodigestão anaeróbia.
Fonte: PORTAL DO BIOGÁS, 2013.

2.1.1.2 Parâmetros que afetam a produção do biogás

O processo de digestão anaeróbica depende muito das condições ambientais, ou seja, para se obter uma quantidade satisfatória de biogás, além de se obter um gás de qualidade, com alto teor de metano, é necessário que todos os parâmetros que afetam a produção do biogás estejam devidamente corretos. Estes fatores serão citados a seguir.

2.1.1.2.1 Temperatura interna do biodigestor

A temperatura é um parâmetro de extrema importância para a produção do biogás, pois com o calor os microorganismos que fazem parte da digestão anaeróbica irão se desenvolver e gerar quantidades satisfatórias de biogás (KARLSSON et al, 2014). Estes microorganismos se dividem em psicrófilo, na qual sua faixa ótima de temperatura para se desenvolver é entre 5 a 20°C, mesófilo, cuja faixa de temperatura é de 20 a 40 °C e termófilo, cuja faixa de temperatura é de 45 a 70°C (ONUDI, 2014). Como o processo de biodigestão é mais eficaz na fase da metanogênese, sendo que a maioria dos microorganismos pertence à faixa mesofílica, a temperatura ideal seria em torno de 37°C (RIZZONI, Leandro Becalet et al, 2012). A Figura 3 mostra a influência da temperatura no desenvolvimento das bactérias metanogênicas. Essas bactérias são bastante sensíveis a variações de temperatura, assim deve-se manter sempre constante com no máximo variações de +/- 0,5°C para se obter uma qualidade melhor do biogás (KARLSSON et al, 2014). Este é um dos motivos para que os biodigestores sejam implantados no subsolo.

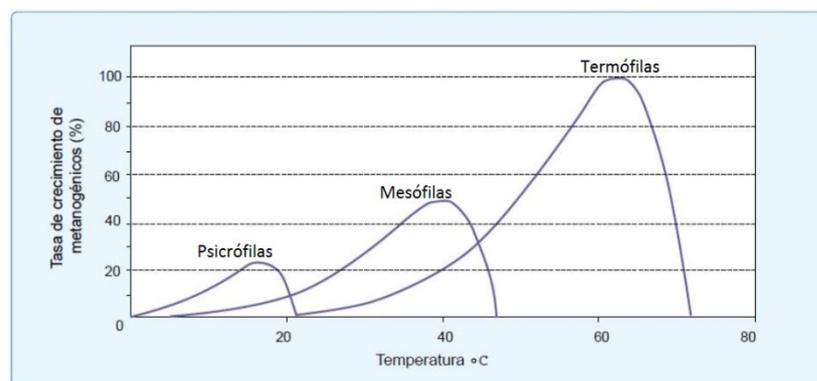


Figura 3- Taxa de crescimento das bactérias metanogênicas em relação à temperatura.
Fonte: SPEECE, 1996.

2.1.1.2.2 PH

O pH é um parâmetro que indica o desempenho do processo de biodigestão anaeróbica (LEITE et al, 2003). Para se obter um melhor funcionamento dos microorganismos na digestão, o pH ideal seria próximo a neutralidade ou então mais elevado, entre 6,0 a 8,0, sendo o ponto ótimo 7,0 (KISPERGHER, 2013). Caso o pH for abaixo de 6,0, no caso um pH ácido, ocorre a inibição das atividades das bactérias (LEITE et al, 2003).

2.1.1.2.3 Tempo de retenção

O tempo de retenção é o tempo necessário para que todo o dejetos no interior do biodigestor seja totalmente fermentado (JÚNIOR et al, 2006). Normalmente este tempo é de 20 a 30 dias, depende do dejetos que será colocado no biodigestor. A Tabela 1 mostra o tempo de retenção para alguns dejetos de animais. Com uma temperatura mais elevada pode-se diminuir o tempo de retenção e assim agilizar o processo de produção do biogás (OLIVEIRA et al, 2009).

Tabela 1- Tempo de retenção do esterco bovino, suíno e de aves.

Matéria Prima	TRH
Esterco bovino líquido	20-30 dias
Esterco suíno líquido	15-25 dias
Esterco de ave líquido	20-40 dias

Fonte: OLIVEIRA et al, 2009.

2.1.1.2.4 Nutrientes

Para o desenvolvimento dos microorganismos, os principais nutrientes necessários são o nitrogênio, carbono e os sais minerais (DE SOUZA, 2012). Porém para se obter uma produção adequada de biogás a relação carbono/nitrogênio tem que ser entre 20:1 e 30:1, pois o excesso de nitrogênio causa a produção de substâncias nitrogenadas (JUNQUEIRA, 2014).

2.1.1.2.5 Inexistência de ar

Dentro do biodigestor ocorre a fermentação realizada por bactérias que se reproduzem sem a presença de oxigênio, ou seja, as bactérias anaeróbicas. Estas bactérias são responsáveis pela produção do metano, que é o principal gás constituinte do biogás e que serve como combustível. Portanto, para que esta digestão ocorra de forma satisfatória o biodigestor tem que estar bem vedado para que não haja a existência de oxigênio, e assim, ocorrer à fermentação (DE SOUZA, 2012).

2.1.2 Características do biogás

O biogás é composto basicamente de metano (50% a 80% em volume) e dióxido de carbono (20% a 40% em volume), apresentando uma pequena porcentagem de hidrogênio (H₂), nitrogênio (N₂) e gás sulfídrico (H₂S). A Tabela 2 apresenta a concentração desses gases no biogás (COLDEBELLA, 2006).

Tabela 2- Concentração dos elementos que constituem no biogás.

GÁS	SÍMBOLO	CONCENTRAÇÃO NO BIOGÁS (%)
Metano	CH ₄	50-80
Dióxido de carbono	CO ₂	20-40
Hidrogênio	H ₂	1-3
Nitrogênio	N ₂	0,5-3
Gás Sulfídrico e outros	H ₂ S, CO, NH ₃	1-5

Fonte: COLDEBELLA, 2006.

Como pode perceber na Tabela 2, o metano é o componente que apresenta em maior concentração no biogás. Este gás é considerado inodoro, incolor e altamente combustível (JUNQUEIRA, 2014). Devido a este fato, o biogás se torna uma alternativa energética, com um poder calorífico entre 5.000 a 7.000 Kcal por metro cúbico, podendo chegar até mesmo a 12.000 Kcal por metro cúbico, quando este for submetido a uma purificação (GASPAR et al, 2003).

A Tabela 3 mostra uma comparação do metro cúbico do biogás com outras fontes energéticas existentes.

Tabela 3- Equivalência do metro cúbico de biogás com outras fontes energéticas.

Combustíveis	1m³ de biogás equivale a
Gasolina	0,613 litros
Querosene	0,579 litros
Óleo diesel	0,553 litros
Gás de cozinha (GLP)	0,454 litros
Lenha	1,536 Kg
Álcool hidratado	0,790 litros
Eletricidade	1,428 kw

Fonte: GASPAR et al, 2003.

Embora o metro cúbico do biogás seja equivalente a menos de 1 litro destes combustíveis citados na Tabela 3, o custo deste gás é bem menor, pois, na verdade, o gasto para a produção do biogás seria para a construção dos biodigestores. Depois destes construídos e em funcionamento, o biogás é produzido diariamente sem custos relevantes, e em grandes quantidades. Já os demais apresentam um custo alto, pois são derivados do petróleo.

2.1.3 Aplicações do biogás

A utilização da energia produzida pelo biogás pode ser aproveitada para geração de energia elétrica e térmica, iluminação, combustível para veículos, aquecimento, entre outras utilidades. Normalmente, as fazendas que possuem biodigestores, utilizam o biogás para a produção de energia elétrica, com a finalidade de economizar. Porém, existem lugares que a demanda de biogás produzida diariamente não consegue suprir todo o consumo de energia do local, assim, utilizam o biogás produzido em iluminação a gás, fogões a gás, no aquecimento de água, entre outros, pois estes equipamentos não necessitam de uma quantidade tão grande de biogás quando comparados aos motores para geração de energia elétrica.

2.1.3.1 Geração de energia elétrica

O biogás produzido diariamente por meio dos biodigestores pode ser utilizado para gerar energia, e, com isso, obtendo-se uma queda no consumo de energia

elétrica proveniente da concessionária (OLIVEIRA et al, 2009). O potencial energético deste gás é dado com base na quantidade de metano constituinte, pois é este componente que apresenta um alto poder calorífico, assim, quanto maior for a concentração deste no biogás, mais energia elétrica será produzida (SUZUKI et al, 2011).

A transformação do biogás em energia elétrica se dá por meio da conversão da energia química contida nas moléculas deste gás em energia mecânica, por meio de um processo de combustão. A energia mecânica gerada movimentada o conjunto motor-gerador que a converte em energia elétrica (FOGAÇA, 2017).

Atualmente, os motores de combustão interna são os mais utilizados para fazer a conversão da energia mecânica, proveniente do biogás, em energia elétrica, destacando-se os motores de Ciclo Otto e as microturbinas.

Para a utilização dos motores Ciclo Otto usando o biogás como combustível, é necessário fazer algumas modificações nos seus sistemas de ignição, alimentação e taxa de compressão. O funcionamento dos motores ciclo Otto se baseia na aspiração da mistura ar-combustível, antes de ser comprimida no interior dos cilindros, e a combustão desta mistura é dada por centelha produzida na vela de ignição (ICLEI-BRASIL, 2009). Assim, após a queima do gás, o motor Otto alimenta o gerador de energia elétrica. Estes motores alimentados por biogás possuem uma eficiência volumétrica menor que a dos motores alimentados com combustíveis derivados do petróleo, devido ao fato de sua ignição ser por centelha. Entretanto, o Ciclo Otto alimentado pelo biogás consegue trabalhar com uma taxa de compressão bastante elevada, compensando, assim, a eficiência volumétrica (SOUZA, J.; SOUZA, S. M. N.; MACHADO, 2004).

As vantagens deste tipo de tecnologia de conversão em energia elétrica é a economia gerada para o consumidor, pelo fato da energia proveniente do biogás ser descontada da fatura de energia e o excedente da produção ser trocado por créditos junto à concessionária de energia. Estes créditos podem ser utilizados nos meses seguintes e tem validade de 60 meses, de acordo com a Resolução 482/2012. Porém, o custo do investimento para obter essa tecnologia é alto, os motores Ciclo Otto, dependendo da potência necessária, podem ser bem caros, além disto, tem o investimento com a construção dos biodigestores para a produção do biogás (ICLEI-BRASIL, 2009).

As microturbinas a gás também são motores de combustão interna bastante utilizada para fazer a conversão do biogás em energia elétrica. Seu funcionamento baseia-se na aspiração do ar misturado com o combustível, no caso o biogás, para seu interior com uma velocidade e pressão elevada, para, assim, ser queimado na câmara de combustão (ICLEI-BRASIL, 2009). A partir deste processo de combustão, ocorre a transformação de energia térmica em mecânica, pela expansão do gás quente na turbina. Assim, o gerador acoplado ao eixo da turbina entra em funcionamento (BONA, 2004).

Esta forma de conversão de energia também apresenta vantagens por substituir a energia proveniente das concessionárias pela energia proveniente do biogás. Entretanto, assim como no caso dos motores de Ciclo Otto, as microturbinas também apresentam um alto custo de investimento (ICLEI-BRASIL, 2009).

A Tabela 4 mostra uma comparação dos motores Ciclo Otto com as microturbinas.

Tabela 4- Comparação dos motores Ciclo Otto com as Microturbinas.

Tecnologia de Conversão	Potência instalada	Rendimento Elétrico	Emissão de NOx partes por milhão (ppm)
Motores Ciclo Otto	30 kW - 20 MW	30% - 40%	250 - 3000
Microturbinas a Gás	30 kW - 100 MW	24% - 28%	<9

Fonte: COLDEBELLA, 2006.

Como se pode observar na Tabela 4, os motores de Ciclo Otto apresentam um rendimento elétrico melhor que as microturbinas, porém emitem uma quantidade muito grande de NOx, que é um gás de grande impacto ambiental (ICLEI-BRASIL, 2009).

2.1.3.2 Geração de energia térmica

A geração de energia térmica acontece por meio da combustão direta do biogás. Esta técnica é bem simples, porém não é viável para unidades consumidoras de longa distância, pois o calor não é transportado facilmente (ICLEI-BRASIL, 2009).

As caldeiras são bastante utilizadas na transformação do biogás em calor. Seu funcionamento baseia-se na transmissão do calor obtido pela combustão direta do biogás, em um sistema fechado, para a água ou outro fluido. Essas caldeiras são mais utilizadas em processos agroindustriais (DE ARAÚJO, 2014).

Com o calor proveniente das caldeiras, consegue-se acionar uma turbina a vapor, que se baseia no ciclo de Rankine como princípio de funcionamento. Utiliza-se um fluido para este tipo de combustão, normalmente a água. Assim, antes de entrar na caldeira a água deve ser aquecida para ser transformada em vapor. Dentro da caldeira ocorre uma troca entre o biogás, no caso o combustível usado, e o vapor. Com esta troca ocorre o sobreaquecimento do vapor. Depois disto, o vapor entra na turbina, se expande, transformando a energia do vapor em energia mecânica (DE ARAÚJO, 2014).

Este processo de cogeração é vantajoso para o meio ambiente devido à diminuição de emissão de alguns gases poluentes (ICLEI-BRASIL, 2009).

A turbina a vapor pode também transformar a energia mecânica, proveniente do biogás, em energia elétrica, basta esta acionar um gerador elétrico.

2.1.3.3 Combustível para veículos ou Biometano

Para o uso do biogás como combustível para veículos, é necessário fazer a purificação deste gás. Esta técnica consiste na remoção de alguns componentes que constituem no biogás, como o ácido sulfúrico (H_2S) e o dióxido de carbono (CO_2), além de aumentar o teor de concentração do metano. Isto é necessário porque a porcentagem máxima de CO_2 que deve conter no biogás para funcionar como combustível veicular é 5% e a mínima de metano é 86%, além de que, alguns componentes do biogás prejudicam seu processo de combustão e diminuem sua eficiência como combustível (MIYAWAKI, 2014).

O processo da purificação se inicia retirando o ácido sulfúrico do biogás, para isso, coloca-se o biogás em um filtro de óxido de ferro. Após passar por este filtro, o biogás é conduzido para um compressor de baixa capacidade, eliminando-se o CO_2 . Depois de removidos o CO_2 e o H_2S da mistura, o biogás passa por um processo de secagem, finalizando o processo de purificação (JÚNIOR et al, 2006).

Os veículos que forem utilizar o biogás como combustível têm que ser adaptados para esta tecnologia. Por isso, o mais viável é adaptar os veículos que

utilizam motores a diesel, pois estes já possuem taxa de compressão elevada, necessitando-se apenas de uma válvula reguladora de pressão e dosadora (JÚNIOR et al, 2006).

2.2 Biofertilizante

A digestão anaeróbica, além de produzir o biogás, como já foi dito, resulta, também, na produção do biofertilizante. Este subproduto é uma excelente opção de adubo para as plantas, pois além apresentar um baixo custo comparado aos fertilizantes químicos, apresenta uma composição de nutrientes necessários para o desenvolvimento das lavouras e, não causa danos ao meio ambiente (OLIVER et al, 2008).

O biofertilizante é um material orgânico isento de agentes causadores de doenças e pragas às plantas. Como não possui um cheiro desagradável, este material não atrai moscas, insetos e microorganismos patogênicos causadores de doenças nas plantas (JÚNIOR et al, 2006).

O biofertilizante apresenta uma maior quantidade de nutrientes ao comparado com fertilizante químico, desta forma facilita a sua absorção pelas plantas. A composição deste fertilizante orgânico é baseada em macro e micronutrientes. Dentre os macros nutrientes têm-se de 1,5 a 4,0% de nitrogênio, 1,0 a 5,0% de fósforo e 0,5 a 3,0% de potássio, e como micronutrientes têm-se o cálcio, magnésio, enxofre, ferro, zinco, entre outros (OLIVEIRA et al, 2009).

Este material, além de tudo, contribui para o restabelecimento do teor de húmus do solo, que melhora suas propriedades físicas e químicas (OLIVEIRA et al, 2009).

Outro fator que torna o biofertilizante vantajoso, é a sua concentração de pH. Este material apresenta um pH em torno de 7,0 a 8,0, normalmente 7,5, que pode ser considerado um pH básico, funcionando como um corretivo de acidez para o solo. Devido a esse pH mais elevado dificulta a proliferação de fungos nas plantações (OLIVEIRA et al, 2009).

O biofertilizante pode ser aplicado diretamente nas lavouras, porém para isto, precisa-se adicionar 10 litros de água para cada 1 litro de biofertilizante. Em muitas lavouras, este biofertilizante já é considerado um sucesso, como nos cafezais,

canaviais, dentre outras. Porém, vale ressaltar, que no Brasil é proibida a aplicação deste material no cultivo de hortaliças, pois são digeridas cruas (EMBRAPA, 1981).

2.3 Biodigestores

O biodigestor é constituído por um compartimento fechado onde ocorre a digestão anaeróbica de toda a biomassa contida em seu interior. Para que esta digestão seja efetuada com sucesso não pode haver a existência de ar. Como subproduto dessa fermentação tem-se o biogás, que produz energia, e o biofertilizante (ECYCLE, 2017). Normalmente os biodigestores são construídos no subsolo no intuito de obter uma temperatura mais elevada e constante em seu interior e assim produzir uma quantidade de biogás satisfatória (OLIVEIRA et al, 2009).

Existem dois tipos de biodigestores, os contínuos e os descontínuos, também conhecidos como batelada. Os contínuos são compostos por uma caixa de carga, uma câmara de digestão e uma caixa de descarga (RIZZONI, 2012). Assim, os dejetos são inseridos na caixa de carga, continuamente, que passa para a câmara, onde acontecerá a fermentação. Por fim, o biofertilizante formado sai pela caixa de descarga, ou seja, nesse processo não precisa abrir o biodigestor para a retirada do subproduto, e a entrada de dejetos pode ocorrer diariamente, além disso, estes biodigestores produzem o biogás continuamente. Dentre os biodigestores contínuos os mais comuns são o indiano, o chinês e o canadense, conhecido também como fluxo tubular, que serão citados posteriormente. Já os descontínuos, somente serão abertos para a renovação dos dejetos após a produção do biogás e do biofertilizante, dependendo do material que foi inserido, esta atividade pode demorar 90 dias (EMBRAPA, 1981).

Os materiais utilizados como carga para qualquer um desses biodigestores têm que ser diluídos em água, e a quantidade desta dependem do tipo de dejetos (JÚNIOR et al, 2006).

2.3.1 Breve histórico dos biodigestores

Após a descoberta do biogás como uma alternativa de combustível, difundiu-se, depois de várias pesquisas, o uso de biodigestores (PEDERIVA et al, 2012). A

Índia foi o primeiro país a construir uma instalação operacional destinada à produção de biogás, na cidade de Bombaim em 1857. Depois disto, o uso de biodigestores só foi intensificado durante a Segunda Guerra Mundial, devido à escassez e dificuldade de acesso a fontes fósseis de combustível. No período da guerra, os indianos, então, intensificaram suas pesquisas sobre biodigestores, e em 1939, o Instituto Indiano de Pesquisa Agrícola, em Kanpur, desenvolveu a primeira usina de gás de esterco. Com o sucesso desta usina, em 1950, os indianos, formaram o Gobar Gas Institute (Instituto de Gás de Esterco), que tinha como finalidade tratar os dejetos de animais e produzir o biogás e o biofertilizante (PALHARES, 2008).

A utilização do biogás como fonte de energia na Índia, motivou os chineses a adotarem tal tecnologia. Além disto, em meados do ano 50 e 60, estava ocorrendo à guerra fria, e a China preocupava-se com a questão energética do país, pois temia que algum ataque nuclear pudesse atingir toda sua atividade econômica. Então, em 1958, os chineses começaram a adotar tal tecnologia e em 1972 já haviam instalado 7,2 milhões de biodigestores (PALHARES, 2008).

Em 1973, houve uma crise energética no mundo, assim os biodigestores começaram a ser uma tecnologia de destaque em diversos países, não somente na China e na Índia. Em 1979, o Brasil começou a buscar outros meios de produção de energia, foi, então que a Embraer, instalou pela primeira vez esta tecnologia no Brasil, era um biodigestor no modelo chinês, na "Granja do Torto" em Brasília (MARIANO, 2011). Depois disto, o governo tomou algumas medidas para influenciar a instalação de mais biodigestores no país, com a finalidade de substituir o petróleo por fontes renováveis de energia. Nesta época, cerca de sete mil biodigestores foram instalados no Brasil (ADMIN, 2013).

2.3.2 Biodigestores contínuos

Nesta seção, será relatado sobre os biodigestores contínuos com maior abrangência no mundo, que são: indiano, chinês e canadense.

2.3.2.1 Biodigestor indiano

Como já foi dito, este biodigestor é caracterizado como contínuo. Por este motivo, os dejetos mais indicados para alimentá-lo são os bovinos e os suínos,

devido à grande quantidade de resíduos que estes animais conseguem eliminar por dia (EMBRAPA, 1981). Outra característica deste biodigestor é que este apresenta uma cápsula na vertical, assim ocupa menos espaço no terreno, tornando-o vantajoso (GESTÃO NO CAMPO, 2017). Os dejetos que forem inseridos neste biodigestor têm que apresentar apenas uma pequena parte de materiais sólidos, no máximo 8%, e o restante líquido, para facilitar o manuseio do resíduo dentro da câmara de biodigestão (EMBRAPA, 1981).

O biodigestor indiano é composto por vários componentes, que serão citados abaixo:

1. Caixa de carga: este compartimento é onde os dejetos já diluídos em água são inseridos para depois serem fermentados. Esta caixa é feita normalmente de alvenaria (JÚNIOR et al, 2006).
2. Tubo de carga: este tubo serve para conduzir os dejetos da caixa de carga para a câmara de biodigestão. Esta condução é feita por gravidade, por isso estes tubos são construídos de forma a ficarem inclinados (JÚNIOR et al, 2006).
3. Câmara de biodigestão: este é o local onde ocorre a digestão anaeróbica dos dejetos, produzindo o biogás e o biofertilizante. Esta câmara normalmente é construída abaixo do nível do solo, pois como a fermentação ocorre nesta, a temperatura em seu interior tem que ser bastante elevada, como já foi mencionado. E, também, normalmente é feita de alvenaria, evitando constantes manutenções (JÚNIOR et al, 2006).
4. Gasômetro: o gasômetro fica acoplado na parte superior da câmara de biodigestão. O biogás produzido pela ação das bactérias anaeróbicas é armazenado neste local. Este compartimento é uma campânula móvel de material impermeável e bem rígido para que não ocorra a vazão do biogás (OLIVEIRA et al, 2009).
5. Tubo- guia: este elemento serve somente para guiar o gasômetro quando este se locomover, pois de acordo com o volume de biogás produzido o gasômetro se desloca para cima ou para baixo (JÚNIOR et al, 2006).
6. Tubo de descarga: este tubo é responsável pela retirada do material já fermentado de dentro da câmara de biodigestão para a caixa de descarga. Este tubo é feito da mesma maneira que o tubo de carga, normalmente de PVC (JÚNIOR et al, 2006).

7. Caixa de descarga: este é o local para onde o material já fermentado, o biofertilizante, é levado. A partir deste local o proprietário pode pegar este subproduto para ser utilizado (JÚNIOR et al, 2006).
8. Saída de biogás: esta saída situa-se na parte superior do gasômetro permitindo que o biogás armazenado seja direcionado até os pontos de consumo. Normalmente este combustível é levado por meio de mangueiras flexíveis (JÚNIOR et al, 2006).

Estes componentes, para um melhor entendimento, podem ser visualizados na Figura 4.

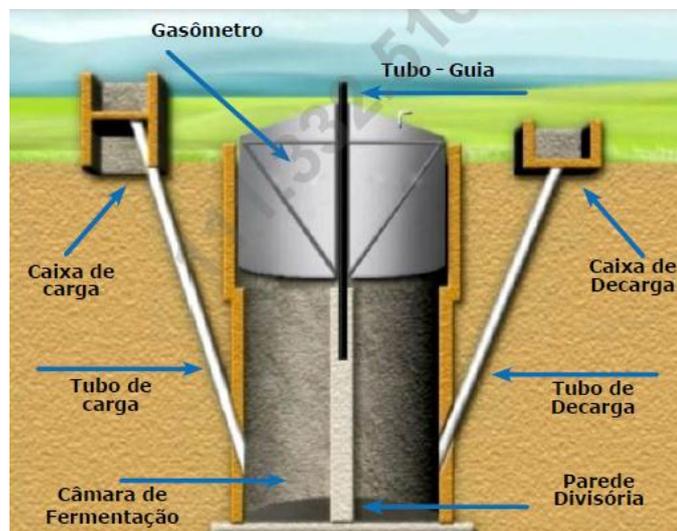


Figura 4- Biodigestor indiano.
Fonte: JÚNIOR et al, 2006.

Pode-se observar na Figura 4, que o biodigestor indiano apresenta também uma parede divisória, cuja função é fazer com que o material circule no interior da câmara de fermentação de forma homogênea (JUNQUEIRA, 2014).

Uma das principais vantagens do biodigestor indiano, é que este apresenta uma pressão constante. Isto acontece pelo fato de que o gasômetro consegue se deslocar para cima ou para baixo de acordo com a quantidade de biogás produzida. Quando ocorre um aumento do volume deste combustível, o gasômetro tende-se deslocar verticalmente, mantendo, assim, a pressão (EMBRAPA, 1981).

Economicamente, este tipo de biodigestor é viável, pois é de fácil instalação, mas caso o gasômetro for de metal poderá ter um aumento de custo. Outro fato que também pode tornar este biodigestor caro seria a sua construção longe dos locais de

consumo de energia, assim teria muito gasto com o deslocamento do biogás (EMBRAPA, 1981).

A Figura 5 representa uma imagem tridimensional em corte do biodigestor indiano para visualizar melhor seu interior.

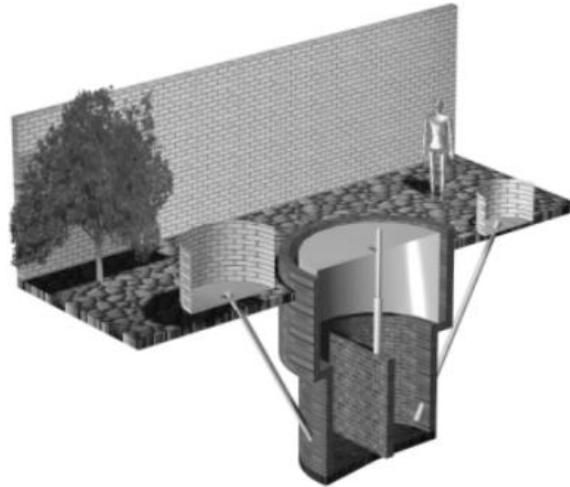


Figura 5- Imagem tridimensional do biodigestor indiano.
Fonte: EMBRAPA, 1981.

2.3.2.2 Biodigestor chinês

Assim como o indiano, o biodigestor chinês também é de operação contínua, podendo receber dejetos diariamente com no máximo 8% de sólidos totais, para evitar entupimentos dos canos de entrada e para facilitar a circulação do resíduo dentro da câmara de fermentação (DEGANUTTI, PALHACI, ROSSI, *et al*, 2002).

Este biodigestor é constituído por uma câmara de fermentação já acoplada com o gasômetro, porém, neste caso o gasômetro não é uma parte móvel, reduzindo, assim, o custo de construção deste biodigestor, contudo pode ocorrer escapamento do biogás caso este compartimento não seja bem vedado. Esta estrutura é feita de alvenaria ou de concreto e fica totalmente submerso no solo, o que dificulta um pouco sua construção (CARON, 2009).

O princípio de funcionamento deste biodigestor baseia-se em uma prensa hidráulica. Como o gasômetro não é móvel, a pressão no interior deste biodigestor não é constante. Assim, quando o volume do biogás aumenta, conseqüentemente, a pressão no interior da câmara aumentará, fazendo com que este combustível seja deslocado para a caixa de saída, e, caso a pressão do gás no interior da câmara for

baixa, ocorre o deslocamento no sentido contrário, ou seja, da caixa de saída para a câmara. Este fenômeno também é conhecido como descompressão (PERMINIO, 2013).

Este tipo de biodigestor costuma ser instalado em lugares de pequeno e médio porte, pois parte do biogás produzido é liberado para a atmosfera, a fim de reduzir sua pressão interna (JUNQUEIRA, 2014).

A Figura 6 mostra uma imagem tridimensional em corte do biodigestor chinês, para uma melhor visualização de seu interior.

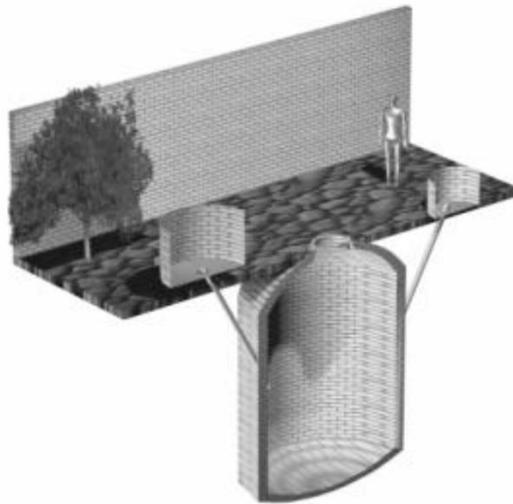


Figura 6- Imagem tridimensional do biodigestor chinês.
Fonte: EMBRAPA, 1981.

2.3.2.3 Biodigestor canadense

O biodigestor canadense, conhecido também como biodigestor de fluxo tubular, é o mais utilizado no Brasil, devido a sua facilidade de implantação e seu baixo custo. É um modelo do tipo horizontal, pois sua largura é maior que a sua profundidade, e é feito praticamente todo em alvenaria, por isto o baixo custo (DE OLIVEIRA, 2013).

Este modelo é constituído por uma caixa de entrada, onde são inseridos os dejetos diluídos em água; uma câmara de digestão, onde ocorre todo o processo de fermentação dos dejetos por meio da ação das bactérias anaeróbicas; uma campânula situada a cima da câmara, onde fica armazenado o biogás produzido, normalmente feito por uma manta de plástico; uma caixa de saída, onde ficam os

dejetos já fermentados para serem utilizados; e uma saída do biogás (DE OLIVEIRA, 2013). A Figura 7 mostra este biodigestor indicando seus componentes.

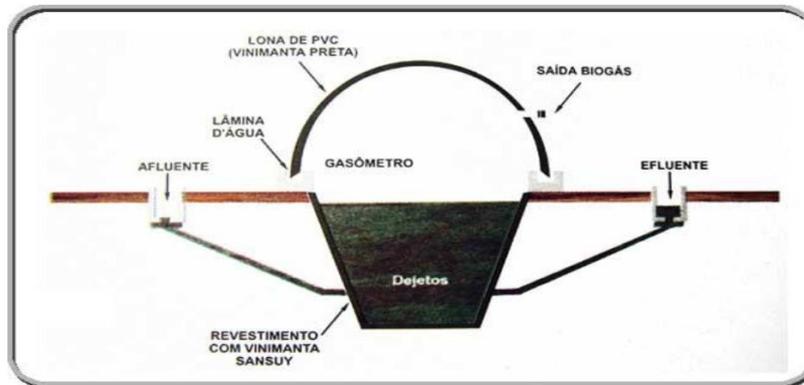


Figura 7- Biodigestor canadense.
Fonte: STACHISSINI, 2014.

Embora este biodigestor apresente a vantagem de ser de fácil construção, este possui menor durabilidade, além de estar mais sujeitos a escapamento do biogás, caso a manta de plástico seja perfurada (JÚNIOR et al, 2006).

Este modelo de biodigestor é muito utilizado em projetos industriais ou agroindustriais, devido a sua capacidade de armazenamento, ou seja, consegue receber uma grande quantidade de dejetos para serem fermentados. Por causa disto, este biodigestor produz bastante biogás e biofertilizante (OLIVEIRA et al, 2009).

2.3.3 Biodigestor descontínuo ou batelada

Existem alguns casos em que não dá para abastecer um biodigestor com dejetos diariamente, como ocorre na avicultura de corte. Neste caso, esta produção não consegue eliminar dejetos suficientes para preencher um biodigestor contínuo, normalmente os resíduos são retirados das granjas de 60 em 60 dias. Assim, o biodigestor mais viável para esta situação é o do tipo batelada (JÚNIOR et al, 2006).

Este tipo de biodigestor é constituído por uma câmara de fermentação, feita de alvenaria, e um gásômetro móvel, feito de material metálico, como pode ser visto na Figura 8. Por não ser abastecido diariamente, este modelo não necessita de caixa de entrada e de saída. Os resíduos já diluídos em água são inseridos de uma

vez na caixa de fermentação e somente são retirados após a produção completa do biogás e do biofertilizante, ou seja, quando a fermentação dos dejetos for completada. Este tempo de fermentação dependerá do tipo de dejetos inserido no biodigestor, pode ser 60 dias ou até mesmo 90 dias (JÚNIOR et al, 2006). Quando este processo for finalizado, o biodigestor é limpo e, então, receberá novos dejetos para a inicialização de um novo processo (ROSEIRA, 2013).

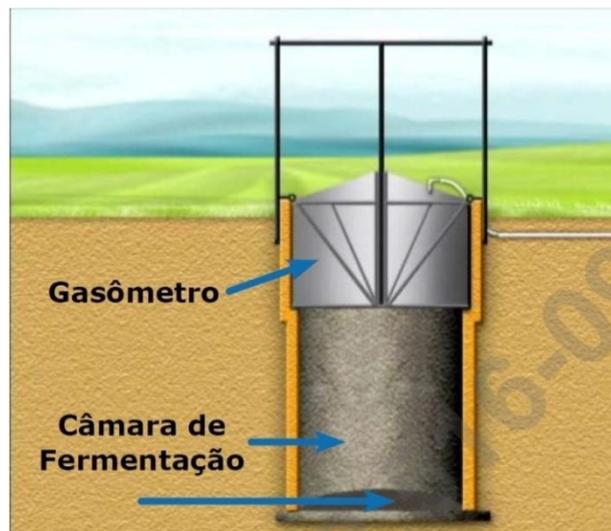


Figura 8- Biodigestor batelada.
Fonte: JÚNIOR et al, 2006.

2.3.4 Biodigestores no mundo

Como os biodigestores produzem o biogás, que é um gás rico em metano, sendo, portanto, uma alternativa energética, muitos países adotaram este tipo de tecnologia para ajudar a suprir a sua demanda de consumo de energia. Embora o investimento para a instalação de biodigestores é alto, o biogás apresenta um preço mais acessível que a energia proveniente das concessionárias, além disto, é considerado como uma fonte de energia limpa. A seguir será relatado sobre alguns biodigestores de destaque no mundo.

2.3.4.1 Alemanha

A Alemanha é um dos países mais fortes em relação a projetos de biodigestores, sendo considerada uma das potências mundiais na produção do

biogás. Na cidade de Könnern, situada no estado da Saxônia-Anhalt, tem uma usina de biodigestores que consegue suprir a demanda de energia de locais até mesmo distantes da usina (ADMIN, 2013).

A construção desta usina teve como investimento 30 milhões de euros, sendo constituídos por 16 biodigestores de grande porte, 12 purificadores para eliminar os elementos que prejudicam a combustão do biogás, além de apresentar um sistema praticamente todo automatizado (ADMIN, 2013).

A usina de Könnern está em operação desde 2009, fornecendo 15 milhões de metros cúbicos de biogás por ano, que é utilizado para suprir a demanda de energia das residências e até mesmo de indústrias na Alemanha. Para fornecer esta quantidade de biometano, a usina faz parceria com 30 agricultores que fornecem cerca de 120 mil toneladas de dejetos de animais por ano para abastecer os biodigestores, sendo que cada tonelada corresponde à produção de 125 m³ de biogás (ADMIN, 2013).

Hoje em dia, a Alemanha possui 3,7 mil usinas de biogás em operação. Com isto, o país já conseguiu eliminar três usinas nucleares, o que se torna vantajoso, pois as usinas de biogás geram energia renovável e limpa (ADMIN, 2013).

2.3.4.2 Estados Unidos

Na Califórnia está em operação desde 2013 a usina de biodigestão de Sacramento, que recebe aproximadamente 25 toneladas de resíduos por dia. Por causa disto, esta usina consegue abastecer frotas de caminhões de empresas aliadas, com o uso do biogás como combustível, produzir eletricidade além de produzir biofertilizante agrícola. Um diferencial desta usina é a utilização de resíduos sem a adição de água quando colocados no processo de fermentação, conseguindo, assim, reduzir o tamanho dos biodigestores sem prejudicar na quantidade de biogás produzida (ADMIN, 2013).

O biogás gerado nesta usina tem como maior finalidade no abastecimento de frota de caminhões, chegando a substituir cerca de 3,5 milhões de litros de diesel por ano. Outra finalidade deste biogás produzido é suprir a energia consumida da própria usina, no caso, a energia consumida com o uso dos geradores para a conversão do biogás e nas operações de produção deste gás, sendo considerada, então, uma usina autossuficiente (ADMIN, 2013).

2.3.4.3 China

A China, por ser um dos primeiros países a utilizar esta tecnologia, apresenta tecnologia e experiência avançada neste ramo. Existem vários casos de usinas de biodigestores neste local, porém destaca-se a usina Aning Starch CNG, localizada na cidade de Nanning, próximo a Hong Kong, que está em operação desde 2010 (ADMIN, 2013).

O biogás gerado nesta usina é purificado e consegue suprir a demanda de combustível de cerca de 120 táxis da cidade. Para o abastecimento do biodigestor utiliza-se efluentes do processo de amido da Aning Starch Co., o que contribui com a preservação do meio ambiente, pois sem esta usina o biogás era queimado e lançado na atmosfera, sendo que neste caso, este gás torna-se um agente causador do efeito estufa (ADMIN, 2013).

A produção de biogás para a alimentação dos veículos por dia é de 21.000 m³. Com a comercialização do biogás para os postos de combustíveis, a usina obtém um lucro de U\$ 4 milhões por ano. Além desta implantação de biodigestores ser vantajosa para a usina que a possui, é viável também para os consumidores, visto que 1 m³ de biogás corresponde a 1,2 L de gasolina, gerando uma economia de U\$ 3 centavos por quilômetro, o que em um ano corresponde U\$ 5.500 de economia (ADMIN, 2013).

Na cidade de Pequim também tem uma usina que se destaca pela potência gerada, sendo em torno de 14 milhões de kWh/ano. A usina Beijing Yanqing Deqingyuan, recebe diariamente 212 toneladas de dejetos de aves, o que gera cerca de 7 milhões de m³ de biogás por ano (ADMIN, 2013).

2.3.4.4 Brasil

O Brasil ainda apresenta bastante atraso no que diz respeito a esta tecnologia de biodigestores. Os primeiros desenvolvimentos desta técnica começaram com a crise energética do petróleo na década de 70, chegando a ser construído cerca de 200 biodigestores somente no estado da Paraíba (OLIVER et al, 2008). Além disto, nesta mesma época, foi realizado o projeto de difusão do biogás, da Empresa de Assistência Técnica e Extensão Rural (EMATER), no estado de São Paulo e no Distrito Federal. No entanto, a implantação de biodigestores é um pouco complexa,

sendo necessária uma mão de obra qualificada, técnicos especializados para fazer o dimensionamento correto, equipamentos apropriados, além de que, os custos para a instalação e a manutenção dos biodigestores são bem elevados. Por causa destes fatores a instalação de biodigestores foi praticamente cessada, ainda mais com o término dos programas de incentivos de energias renováveis do governo (KARLSSON et al, 2014).

Na década de 90, surgiram outros motivos para implantação dos biodigestores. Muitos países desenvolvidos já haviam adotado esta técnica e tiveram resultados satisfatórios, assim, o Brasil começou novamente a investir neste setor. A questão ambiental teve grande influência no reaparecimento desta tecnologia também, pois o gás metano que é um grande causador do efeito estufa e o componente de maior concentração no biogás seria utilizado como fonte energética, evitando sua emissão. Vale ressaltar também, que o Brasil apresenta o segundo maior rebanho bovino do mundo, e como os biodigestores produzem biogás a partir de dejetos de animais, principalmente os bovinos e suínos, a implantação desta tecnologia nas propriedades rurais se tornaria uma solução para o armazenamento dos dejetos, além de uma produção significativa de biogás (SCHLESINGER, 2010) (KARLSSON et al, 2014).

Portanto, com todos esses motivos e com a falha que ocorreu na distribuição de energia na hidrelétrica de Itaipu em 2009, a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) instituiu a Geração Distribuída de Energia, ou seja, a instituição de energia nas redes de distribuição proveniente de outras fontes que não seja das hidroelétricas. Com a ajuda da hidrelétrica de Itaipu e outras companhias, obteve-se a primeira distribuição de energia por meio do biogás. Esta unidade de biodigestor é localizada na cidade de São Miguel do Iguaçu- PR, onde apresenta uma granja com três mil suínos, o que equivale a uma produção de 360 kW de energia elétrica diariamente, na qual uma parte desta energia é vendida para a concessionária do estado (KARLSSON et al, 2014).

Após o sucesso desta unidade de biodigestores, foram surgindo mais investimentos nesta área nas propriedades rurais. Somente no estado do Paraná surgiram mais cinco unidades geradoras de biogás, sendo que a energia gerada é utilizada para o próprio consumo (KARLSSON et al, 2014).

2.3.4.4.1 Estudo de caso

Neste capítulo será relatado sobre um estudo de caso feito na fazenda Arapé situada próximo a região de Formiga-MG. Destaca-se, nesta seção, o uso, na fazenda, da fonte de energia proveniente dos biodigestores, ou seja, o biogás, levando em consideração a viabilidade econômica que estes geram para a fazenda Arapé.

2.3.4.4.1.1 Característica da fazenda Arapé

A fazenda Arapé é constituída por seis granjas de suínos, um confinamento de bovino e uma fábrica de ração para a própria demanda interna. Os bovinos da Arapé são da raça Nelore, que recebem diariamente uma alimentação balanceada a base de volumoso e concentrado. Os suínos também apresentam uma alimentação bastante adequada, visando em obter uma carne de confiança e qualidade. Com essas criações, a Arapé destaca-se no ramo da exportação de carne suína e bovina, encontrando-se entre as 10 empresas que mais exportam bovinos, devido a excelência na criação destes animais (ARAPE, 2017).

Outra coisa que se destaca na fazenda é a sustentabilidade. Com a criação de suínos, a Arapé consegue desenvolver uma fonte de energia renovável por meio dos biodigestores. Atualmente, esta fazenda dispõe-se de dois biodigestores que conseguem suprir em média 90% da energia que é utilizada (ARAPE, 2017). Este estudo de caso foi realizado com o propósito de analisar a viabilidade econômica que estes biodigestores oferecem para a fazenda.

2.3.4.4.1.2 Visita realizada na fazenda Arapé

No dia 31 de março de 2017, foi realizada a visita na fazenda Arapé com intuito de adquirir todas as informações necessárias para a realização deste trabalho. A fazenda é constituída por seis unidades, sendo que duas destas apresentam biodigestor. Portanto, a visita foi feita somente nestas duas unidades, que são denominadas sítio 1 e sítio 3, dando mais ênfase no biodigestor do sítio 3, devido a grande quantidade de biogás que é produzido por dia, além deste suprir quase toda a energia consumida pela fazenda.

2.3.4.4.1.2.1 Visita realizada no sítio 1

O sítio 1 fica localizado na rodovia BR 354, Km 104, próximo a cidade de Formiga- MG. Este sítio é dotado de uma granja com 7,5 mil porcos, sendo que todo o processo de racionamento para estes animais são automatizados. Para suprir a demanda de energia deste processo, foi construído um biodigestor do tipo canadense. É neste departamento também, que situa a fábrica de ração da fazenda. Esta fábrica consegue produzir toda a quantidade necessária de ração para alimentar as granjas de todos os sítios, sendo, aproximadamente, uma quantidade de 650 toneladas por semana. Para isto, a fábrica precisa funcionar diariamente e dotar também de um sistema automatizado, o que provoca um alto consumo de energia. O biodigestor do sítio 1 foi o pioneiro na fazenda, e, portanto, é bem menor ao comparado com o do sítio 3, desta forma só consegue suprir a demanda de energia do processo de racionamento da sua granja.

Como já foi mencionado neste trabalho, para que o biogás produzido pelos biodigestores seja convertido em energia elétrica, necessita-se de um conjunto motor-gerador. Este equipamento varia de acordo com a quantidade de biogás produzido. No sítio 1, por exemplo, apresenta um gerador com uma potência de 100 kVA, como mostra a Figura 9.



Figura 9- Gerador do sítio 1.
Fonte: Próprio autor.

2.3.4.4.1.2.2 Visita realizada no sítio 3

O sítio 3 também localiza-se na rodovia BR 354, próximo a cidade de Formiga-MG. É dotado de uma granja com aproximadamente 16 mil porcos, sendo constituída por 14 galpões de 60 baias com 19 animais em cada. Com a quantidade de animais neste sítio, tornou-se atraente a construção de um biodigestor de grande porte, como mostra a Figura 10, pois, além de servir como armazenamento para os dejetos, produziria o biogás, diminuindo os custos com energia. Este biodigestor, portanto, supri toda a energia que a granja do sítio 3 consome, a energia consumida pela fábrica de ração localizada no sítio 1, além de toda energia gasta no sítio 2, que seria com o aquecimento da granja, pois é onde localiza a creche, e com o processo de racionamento.



Figura 10- Biodigestor situado na fazenda Arapé.
Fonte: Próprio autor.

Percebe-se na Figura 10 que o biodigestor situado neste departamento da fazenda é do tipo canadense, sendo o mais apropriado, devido à quantidade de dejetos que é introduzido neste diariamente.

O despejo dos dejetos nos biodigestores é feito totalmente por meio de tubulações. Em cada baia apresenta canaletas, como mostra a Figura 11, para que os dejetos, ou seja, urina, esterco e a água desperdiçada nos bebedouros, possam cair por essas canaletas. Sabe-se que, para que os dejetos sejam encaminhados para o biodigestor, necessita diluí-los em água. Como no sítio 3 apresenta 14 galpões, toda dia é feita a lavagem de dois destes, assim, essa mesma água que serve para a limpeza dos galpões, serve para diluir os dejetos. Cada galpão apresenta, aproximadamente, seis caixas com 400 litros de água, para serem

utilizadas na limpeza. Estes resíduos que passaram pelas canaletas, são levados, com a água, para os corredores, que chegam até uma caixa central. Após isso, o processo para levar os dejetos até os biodigestores é feito por meio de tubulações. O fato de utilizar dejetos de apenas dois galpões por dia para alimentar o biodigestor, é para que não ocorra sobrecarga, pois o biodigestor já foi construído para caber certa quantidade de dejetos por dia, no caso, como em dois galpões são 2.280 animais, e, considerando que cada animal elimina 5 kg de dejetos, então tem uma média de 11.400 kg de dejetos por dia inseridos no biodigestor.



Figura 11- Baia com canaletas.
Fonte: Próprio autor.

Devido à grande quantidade de dejetos que o biodigestor do sítio 3 consegue armazenar, ocorre a produção de uma alta quantidade de biogás. Assim, para converter todo esse biogás em energia elétrica, necessita-se de um conjunto motor-gerador com alta potência, como mostra a Figura 12.



Figura 12- Gerador do sítio 3.
Fonte: Próprio autor.

Percebe-se na Figura 12, que este gerador é bem maior que o gerador do sítio 1, devido a quantidade de biogás que o alimenta. A potência deste gerador é de 330 kVA.

O biodigestor do sítio 3 consegue produzir, aproximadamente, 105.000 kWh por mês. Como, cada kWh, segundo a CEMIG, custa, R\$ 0,48, para propriedades rurais, assim, tem-se uma economia de R\$ 50.400,00 por mês de energia, somente com este sítio.

O investimento gasto para construir o biodigestor deste sítio foi aproximadamente R\$ 800.000,00. Porém, com a economia de energia que a fazenda Arapé tem por mês, o tempo de retorno de todo o investimento foi em média de 16 meses.

Quando ocorre alguma falha no gerador, tem-se a opção de mudar para a energia da concessionária, como mostra a Figura 13, assim, a energia do mês costuma vim mais cara, porém, isso quase não ocorre.

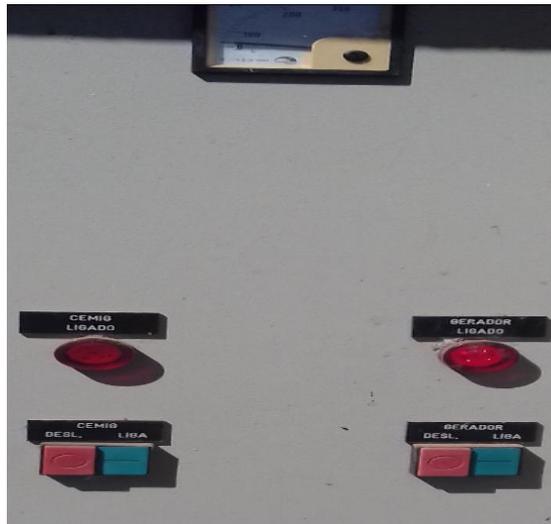


Figura 13- Comando para a escolha da energia proveniente do gerador ou da concessionária.

Fonte: Próprio autor.

Além de ofertar uma economia com a energia, o biodigestor produz biofertilizante, o que também gera lucro para a fazenda Arapé. Em média são produzidos 80 m³ de biofertilizante por dia, que são utilizados para fertilizar áreas de pastagem e capineiras, economizando, assim, com o fertilizante químico.

Com este estudo realizado, pode-se perceber que é viável a construção de um biodigestor, pois além de servir como um local de armazenamento para os dejetos produz o biogás e o biofertilizante, gerando lucros para o estabelecimento. Importante lembrar, também, que com o aproveitamento do biogás para conversão em energia elétrica não ocorre à emissão de metano no meio ambiente. Portanto, sabendo disso, foi projetado um biodigestor para uma fazenda que ainda não possui, no caso, a fazenda da Chácara, situada no município de Campo Belo-MG. No próximo capítulo, será relatado todo o desenvolvimento para o dimensionamento e a construção deste biodigestor.

3 METODOLOGIA

Nesta parte do trabalho são apresentadas todas as informações necessárias para a realização do dimensionamento, construção e operação de um biodigestor, baseado nos dados da fazenda da Chácara, situada no município de Campo Belo-MG. Para isso, foi realizada uma visita à fazenda e foram anotadas todas as informações necessárias para iniciar o projeto do biodigestor.

3.1 Dimensionamento do biodigestor

Primeiramente, é necessária a escolha do tipo de biodigestor mais viável para o local. No caso da fazenda da Chácara será dimensionado o biodigestor indiano, pois é um biodigestor contínuo, seguro, apresenta poucas chances de escapamento do biogás, durável, simples de ser implantado, além de fornecer um biogás sempre com pressão constante. O modelo indiano também é mais indicado para lugares com pouco fluxo de dejetos diariamente, como acontece com a fazenda da Chácara, sendo o mais barato para a implantação.

A fazenda dispõe de um rebanho bovino com 50 vacas leiteiras e 50 bois de corte. Cada animal deste elimina uma quantidade mínima de dejetos, ou seja, fezes e urina, por dia. A Tabela 5 mostra a quantidade de dejetos que alguns animais eliminam por dia.

Tabela 5- Quantidade de dejetos que cada animal elimina por dia.

Animal	Esterco por animal por dia (kg)
Vaca leiteira	25,0
Bovino de corte	15,0
Porca	4,9
Cachaço	6,0
Porca em gestação	11,0
Leitão	0,95
Galinha	0,18

Fonte: Adaptada de JÚNIOR et al, 2006.

De acordo com a Tabela 5, um boi costuma produzir, em média, 15 kg de dejetos por dia, enquanto uma vaca leiteira produz 25 kg. A quantidade de dejetos produzidos, diariamente, por um animal está relacionada com o peso do mesmo, correspondendo a 6% do peso do animal. Assim, foi considerado que um boi de corte pesa, em média, 250 kg e uma vaca leiteira, em média 417 kg (UTEMBERGUE et al, 2016). Portanto, a fazenda apresenta uma quantidade de 2000 kg de dejetos por dia, já que dispõe de um rebanho bovino com 50 vacas leiteiras e 50 bois de corte.

Após saber a quantidade de esterco que é produzido diariamente na fazenda, necessita-se saber a quantidade de água necessária para diluir estes dejetos, visto que, para que ocorra a produção de biogás corretamente, o biodigestor deve ser alimentado com dejetos diluídos em água. Para cada tipo de dejetos, tem-se uma quantidade de água determinada. A Tabela 6 mostra algumas dessas relações.

Tabela 6- Relação esterco/água de alguns tipos de dejetos.

Tipo de dejetos	Relação esterco:água
Suíno	1:2
Bovino	1:1
Aves	1:3

Fonte: Adaptada de OLIVER et al, 2008 e JÚNIOR et al, 2006.

No caso de esterco bovino, como vimos na Tabela 6, para cada parte de dejetos tem uma parte de água, ou seja, 1:1. Assim, de acordo com os dados da fazenda, 2000 kg de dejetos bovinos precisaria de 2000 litros de água.

Os dejetos podem ser retirados do rebanho pelo método da raspagem, que é uma técnica simples, que permite a utilização até mesmo de uma vassoura como auxílio; e por meio de água pressurizada. Neste último caso, é importante saber a quantidade de dejetos para calcular a quantidade de água que seria necessária para a retirada desses resíduos, pois esta água já serviria para sua diluição. Sabe-se que, no caso da fazenda da Chácara, necessita-se de 2000 litros de água, assim, caso for utilizar este último método para a remoção dos dejetos, o correto seria armazenar, todos os dias, esta quantidade de água em um reservatório.

3.1.1 Dimensionamento da altura, volume e diâmetro da câmara de fermentação

Com essas informações obtidas já se consegue calcular o volume do biodigestor. A carga diária que será armazenada no biodigestor seria a soma da quantidade de dejetos com a quantidade de água, como mostra a Equação 1.

$$carga\ diária = dejetos + água \quad (1)$$

$$carga\ diária = 2000 + 2000 = 4000\ l$$

Com o valor da carga diária, calcula-se o volume útil do biodigestor, dado pela seguinte Equação 2:

$$V_{útil} = \frac{carga\ diária \times tempo\ de\ retenção}{1000} \quad (2)$$

Como os dejetos para a alimentação do biodigestor desta fazenda é de bovinos, o tempo de retenção costuma ser de 30 dias, como mostrado na Tabela 1, assim, obtém-se:

$$V_{\text{útil}} = \frac{4000 \times 30}{1000} = 120 \text{ m}^3$$

O biodigestor apresenta uma parede divisória, como foi dito na revisão bibliográfica deste trabalho. Assim, para calcular o volume bruto deste seria necessário levar em consideração esta parede. Então, calcula-se o volume bruto como 10% a mais do volume útil, como está representado na Equação 3.

$$V_{\text{bruto}} = V_{\text{útil}} \times 1,10 = 120 \times 1,10 = 132 \text{ m}^3 \quad (3)$$

Sabendo o volume total do biodigestor, consegue-se encontrar a altura do biodigestor e seu diâmetro interno. Estas dimensões estão especificadas na Figura 14.

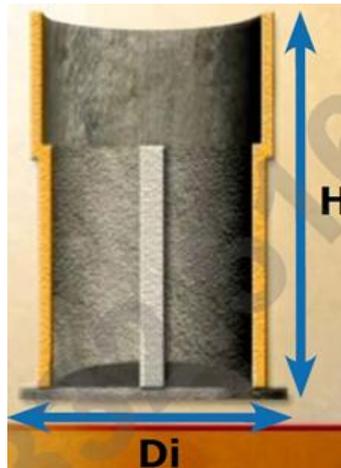


Figura 14- Dimensões do biodigestor.
Fonte: JÚNIOR et al, 2006.

Existe uma faixa aceitável para a relação D_i/H (diâmetro/altura) do biodigestor, como mostra a Equação 4.

$$0,6 \leq \frac{D_i}{H} \leq 1 \quad (4)$$

Quando se trata de um dimensionamento de um biodigestor com menos de 10 m^3 de volume bruto, esta relação deve ser próxima de 0,6, para evitar influências climáticas nos biodigestores, já que se encontram muito próximos da superfície. Como no caso da fazenda da Chácara o volume bruto do biodigestor foi de 132 m^3 ,

ou seja, maior que 10 m^3 , esta razão deve ser mais próxima de 1, proporcionando uma maior eficiência de fermentação (DO BÚ ARAÚJO et al, 2015). Sabendo esta relação, supõe um valor para a altura ou para o diâmetro do biodigestor, desde que este valor atenda a relação da Equação 4. Supõe-se que o diâmetro do biodigestor seja 5,5 m, assim, consegue-se calcular a altura pela Equação 5.

$$V_{bruto} = \frac{\pi \times Di^2 \times H}{4} \quad (5)$$

$$H = \frac{4 \times 132}{\pi \times 30,25} = 5,56 \text{ m}$$

Portanto, a razão Di/H corresponde a 0,99, ou seja, os valores da altura e do diâmetro do biodigestor estão dentro do permitido.

A altura encontrada é denominada de altura útil, assim, precisa-se calcular a altura total do biodigestor. Para isso, basta adicionar na altura útil 0,15 m, correspondente ao desnível devido à pressão do biogás, e mais 0,1 m, como taxa de segurança, evitando, assim, transbordamento (DO BÚ ARAÚJO et al, 2015). Dessa forma, ao todo se adicionam 0,25 m, obtendo um valor de altura total de 5,81 m.

3.1.2 Dimensionamento do gasômetro

Depois de definido as dimensões do biodigestor, calculam-se as dimensões do gasômetro, como mostra a Figura 15.

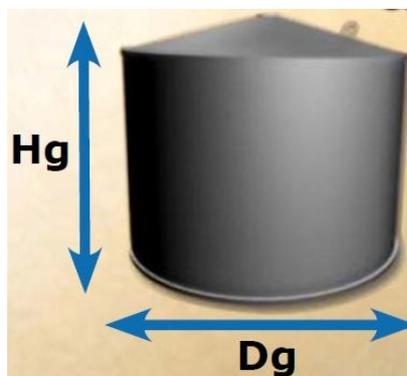


Figura 15- Dimensões do gasômetro.
Fonte: JÚNIOR et al, 2006.

Para calcular as dimensões do gasômetro, é necessário saber quantos metros cúbicos de biogás são produzidos por dia. A Tabela 7 mostra a quantidade de alguns dejetos para a produção de 1 m³ de biogás.

Tabela 7- Quantidade de diferentes tipos de dejetos para a produção de 1 m³ de biogás.

Tipo de dejetos	Quantidade de dejetos para a produção de 1 m ³ de biogás
Suíno	11,3 kg
Bovino	25 kg
Aves	5 kg

Fonte: Adaptada de JÚNIOR et al, 2006.

Por meio da Tabela 7, verifica-se que um esterco bovino de 25 kg produz 1m³ de biogás. Como na fazenda a quantidade de dejetos eliminados por dia é de aproximadamente 2000 kg, então, tem-se uma produção de 80 m³ de biogás diária. Com esses dados, é possível calcular o volume do gasômetro, conforme apresenta a Equação 6.

$$Vg = \frac{\text{volume de biogás/dia}}{2} = 40 \text{ m}^3 \quad (6)$$

O diâmetro do gasômetro está relacionado com o diâmetro do biodigestor, que pode ser calculado por meio da Equação 7.

$$Dg = Di + 0,1 \quad (7)$$

$$Dg = 5,5 + 0,1 = 5,6 \text{ m}$$

Com o valor do diâmetro, calcula-se a altura útil do gasômetro, que também está relacionada com o seu volume, como mostra a Equação 8.

$$Hg \text{ útil} = \frac{4 \times Vg}{\pi \times Dg^2} \quad (8)$$

$$Hg \text{ útil} = \frac{4 \times 40}{\pi \times 5,6^2} = 1,62 \text{ m}$$

Assim, sabendo a altura útil do gasômetro, calcula-se sua altura total. Como no cálculo da altura total do biodigestor, para se calcular a altura total do gasômetro, considera-se o desnível provocado pela pressão e uma taxa de segurança, ambos com os mesmos valores anteriores, conforme apresenta a Equação 9.

$$Hg \text{ total} = Hg \text{ útil} + P + \text{Taxa de segurança} \quad (9)$$

$$Hg \text{ total} = 1,62 + 0,25 = 1,87 \text{ m}$$

3.1.3 Dimensionamento dos tubos de carga e descarga e do tubo-guia

Os tubos de carga e descarga deste biodigestor devem apresentar uma inclinação em torno de 30° para facilitar a condução dos dejetos até a câmara de fermentação e a caixa de saída. A altura destes tubos até o fundo desta câmara costuma ser 30 cm, a fim de impedir que as impurezas mais pesadas afetem na condução dos dejetos, como mostra a Figura 16 (JÚNIOR et al, 2006).

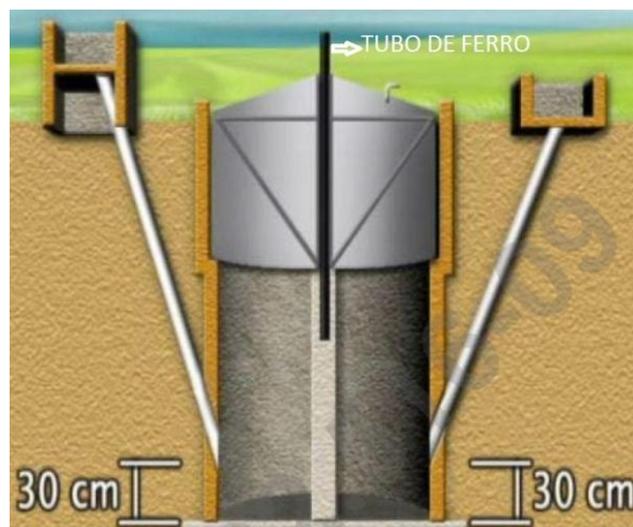


Figura 16- Altura do tubo de carga e descarga com o fundo da câmara de biodigestão.
Fonte: JÚNIOR et al, 2006.

Após saber a inclinação desses tubos, dimensionam-se seus comprimentos. Para melhor entendimento de como dimensionar o cano de descarga, observa-se a Figura 16. Como se pode perceber, a altura total do biodigestor menos a altura do tubo de carga com o fundo da câmara de biodigestão; a inclinação do tubo de descarga; e o afastamento do cano de descarga do biodigestor, que costuma ser 1,6 m, formam um triângulo retângulo. Portanto, fica fácil calcular o comprimento do tubo de descarga, como se pode visualizar na Equação 10.

$$\text{cano de descarga} = \sqrt{(H_{\text{biod.}} - 0,3)^2 + \text{afast.}^2} \quad (10)$$

$$\text{cano de descarga} = \sqrt{(5,81 - 0,3)^2 + 1,6^2} = 5,74 \text{ m}$$

O tubo de carga é praticamente o mesmo comprimento, porém como a caixa de carga está a 0,6 m acima do solo soma-se esse valor em seu comprimento, assim, tem-se um comprimento do cano de carga equivalente a 6,34 m.

Observa-se, também, na Figura 16 um tubo de ferro, cuja dimensão costuma ser calculada em torno de 10% a mais que a altura total do gasômetro, ou seja, como a altura total do gasômetro dimensionado para a fazenda equivale a 1,87 m, o tubo guia terá, portanto, uma altura de 2,06 m.

3.1.4 Dimensionamento da parede divisória e da coluna de concreto

Dentro da câmara de fermentação há uma parede divisória e uma coluna de base para o gasômetro, como pode ser visto na Figura 17. Essa parede pode ser feita com 20 cm de espessura e a coluna de concreto, normalmente, tem 25 cm de lado e altura (JÚNIOR et al, 2006).



Figura 17- Dimensão da parede divisória e da coluna de concreto.
Fonte: JÚNIOR et al, 2006.

3.1.5 Dimensionamento da caixa de carga e da caixa de descarga

Por fim, dimensiona-se a caixa de carga e descarga do biodigestor. Como a finalidade dessas caixas é armazenar a biomassa antes e depois da fermentação, seus volumes, portanto, dependerão da razão entre o volume de dejetos que forem inseridos diariamente no biodigestor e o tempo de retenção. Essa razão é multiplicada por 1,15, como margem de segurança, caso exceda a quantidade de dejetos inseridos por dia. Assim, obtém-se, por meio da Equação 11, o volume das caixas.

$$Vol. das caixas = \frac{V \text{ bruto}}{Tempo de retenção} \times 1,15 \quad (11)$$

$$Vol. das caixas = \frac{132}{30} \times 1,15 = 5,06 \text{ m}^3$$

A altura total recomendável da caixa de carga é 1,20 m, sendo que a mesma deve ser construída 0,6 m acima do solo. Assim, os 0,6 m restantes seria a altura interna da caixa. A caixa de descarga apresenta também os mesmos 0,6 m de altura interna, porém é construída no mesmo nível do solo (JÚNIOR et al, 2006).

As medidas da largura e do comprimento das caixas são dadas pela Equação 12.

$$\text{medida dos lados} = \sqrt{\frac{\text{volume da caixa}}{\text{altura da caixa}}} \quad (12)$$

$$\text{medida dos lados} = \sqrt{\frac{5,06}{0,6}} = 2,9 \text{ m}$$

Então, cada caixa apresenta 0,6 m de altura interna, 5,06 m³ de volume e 2,9 m de comprimento e largura.

Com todos esses valores do dimensionamento encontrados, consegue-se construir um biodigestor do tipo indiano.

3.2 Construção do biodigestor

Com todos os dados de dimensionamento já calculados, o próximo passo é a construção do biodigestor, no caso com base nas informações da fazenda da Chácara.

Para iniciar o levantamento do biodigestor, primeiramente, define-se a localização mais apropriada para a sua construção na fazenda. É importante observar as condições do solo, a distância do local até as unidades de consumo do biogás e a distância do local até os lugares onde ficam os dejetos; sempre tentando construir este equipamento o mais perto possível destes locais. Segundo JUNQUEIRA (2014), o ideal é manter uma distância de 10 m.

Depois de decidido a localização do biodigestor, abre-se um buraco no solo, com uma profundidade de aproximadamente 0,20 m maior que a altura da câmara de biodigestão e de 1,2 m maior que seu diâmetro, garantindo, assim, uma margem de segurança (JÚNIOR et al, 2006). Portanto, as dimensões do fosso da fazenda da Chácara serão de 6,01 m de profundidade e 6,7 m de diâmetro. Além disso, o fundo do buraco deve ser bem nivelado, para isto, utiliza-se cimento, areia e brita.

Após isso, começa-se a construção da base circular de concreto, a qual deve apresentar um diâmetro 0,8 m maior que o diâmetro da câmara de biodigestão (JÚNIOR et al, 2006). Portanto, o diâmetro da base circular no caso da fazenda em questão será de 6,3 m. Para a marcação da base, utiliza-se um gabarito de madeira

com um prego em cada ponta, como se fosse um compasso. Fixa-se um prego no solo e gira o gabarito de madeira, de forma que o prego da ponta faça uma marcação no solo no formato de uma circunferência, como mostra a Figura 18, onde será construída a base de concreto. Esta circunferência apresenta um raio do tamanho do raio da câmara de biodigestão mais 40 cm (JÚNIOR et al, 2006). No caso da fazenda da Chácara, esta circunferência terá 3,15 m de raio.



Figura 18- Marcação da base de concreto.
Fonte: JÚNIOR et al, 2006.

Do lado de fora da marcação feita, coloca-se piquetes da altura que será construída a base de concreto. Depois disso, começa-se a fazer a fôrma da base, empilhando-se tijolos em cima da marca da circunferência.

Depois de construída a base, realiza-se uma marcação no meio da circunferência, para ser construída uma coluna de concreto onde o tubo guia será fixado. Marca-se um quadrado no meio da circunferência, com aproximadamente 20 cm de lado (JÚNIOR et al, 2006). Depois, cava-se um buraco, de em média 40 cm de profundidade, nesta marcação. Dentro desse buraco é introduzida uma armação de ferro, feita com vergalhões, que servirá de auxílio para a construção da coluna de concreto. Após isso, esse buraco é tampado com cimento, areia e brita. Depois de fixar bem essa armação de ferro, coloca-se uma coluna de madeira por fora da armação e a preenche com concreto. O ideal é colocar uma parte de cimento para duas de areia e três partes de brita. Quando faltar apenas 40 cm para esta fôrma de madeira ser preenchida, coloca-se o tubo-guia, que é um tubo de ferro, com 2,06 m de comprimento, de acordo com o dimensionamento realizado para a fazenda da Chácara. Assim que a coluna de concreto secar, retira a fôrma de madeira.

Agora, com a realização da base de concreto e a coluna com o tubo-guia, começa a construção da parede circular da câmara de biodigestão.

Para fazer a marcação de onde será construída a parede, também se utiliza um gabarito de madeira com um prego em cada extremidade, como se fosse um compasso. Fixa-se um prego no solo enquanto o outro faz a marcação da circunferência, a qual terá um raio igual ao raio da câmara de biodigestão mais 2 cm, devido a massa de acabamento no interior (JÚNIOR et al, 2006). Essa parte é realizada fora do local do biodigestor, somente para auxiliar na construção do vergalhão de ferro. Após isso, fixam-se alguns piquetes de madeira no chão, um pouco a frente da linha da circunferência tracejada, e, então, são contornados com um vergalhão de ferro, que terá um raio igual ao raio da câmara de fermentação. No caso da fazenda da Chácara, esse raio será de 2,75 m. Com o auxílio desse vergalhão, marca-se no fosso do biodigestor, com um giz, por exemplo, onde a parede da câmara deverá ser construída. O vergalhão tem que ficar bem centralizado em relação à coluna de concreto, como mostra a Figura 19.



Figura 19- Construção da parede da câmara de fermentação.
Fonte: JÚNIOR et al, 2006.

A construção da parede da câmara de fermentação é realizada com tijolos cerâmicos fixados com concreto, o ideal seria uma parte de cimento para três partes de areia.

Ao mesmo tempo em que a parede da câmara é construída, a parede divisória também vai sendo realizada, utilizando-se também tijolos cerâmicos, como mostra a Figura 20.



Figura 20- Construção da parede divisória.
Fonte: JÚNIOR et al, 2006.

Com 30 cm de parede construída, devem-se deixar dois buracos, um para o cano de carga e o outro para o cano de descarga. Estes buracos terão um valor de diâmetro igual ao diâmetro dos tubos (JÚNIOR et al, 2006). As paredes devem ser construídas até a altura da coluna de concreto fixada no centro do biodigestor, como mostra a Figura 21.



Figura 21- Parede da câmara de fermentação e parede divisória construída.
Fonte: JÚNIOR et al, 2006.

Após a construção da parede da câmara e da parede divisória, ocorre a instalação dos tubos de carga e descarga. Esses tubos devem apresentar uma inclinação de 30° , para facilitar a transportação dos dejetos, como já foi mencionado na parte de dimensionamento do biodigestor (JÚNIOR et al, 2006). A marcação do ângulo é feita utilizando um esquadro. Os tubos são feitos de PVC com aproximadamente 150 mm de diâmetro.

Como foi dito, a parede de fermentação deverá ser construída até a altura da coluna de concreto, e, a partir deste ponto, constrói-se, uma parede com o diâmetro

20 cm maior que o da câmara de biodigestão, no caso da fazenda da Chácara com 5,7 m, e com 20 cm de altura. Após isso, a câmara de fermentação estará totalmente construída. Inicializa-se, então, a construção das caixas de carga e descarga.

As caixas são feitas com argamassa de cimento com areia. Deverão ser realizadas de acordo com o dimensionamento feito neste trabalho e posicionadas próximas à câmara de fermentação com formato, geralmente, quadrado.

Por fim, realiza-se a construção do gasômetro. A estrutura deste componente é feita de chapa de aço. Além disso, apresenta cantoneiras soldadas a um tubo de ferro com um diâmetro um pouco maior que o diâmetro do tubo-guia, para que assim, possa encaixar um no outro com facilidade. Normalmente, o diâmetro do tubo-guia é de 2,5 polegadas, assim, o diâmetro do tubo de ferro do gasômetro pode ser 3 polegadas (JÚNIOR et al, 2006). A cobertura do gasômetro tem um formato cônico, apresentando uma inclinação de 30% do seu raio (JÚNIOR et al, 2006). Como na fazenda da Chácara necessitaria de um gasômetro com 2,8 m de raio, a sua inclinação seria de 0,84 m. Na parte inclinada, é necessário soldar um tubo de ferro que será conectado a uma mangueira flexível, com a finalidade de retirar o biogás e conduzi-lo até os pontos de consumo, como mostra a Figura 22. A parte de distribuição do biogás é feita por meio de tubos de PVC e registros, que serão abertos quando se precisar utilizar o biogás.

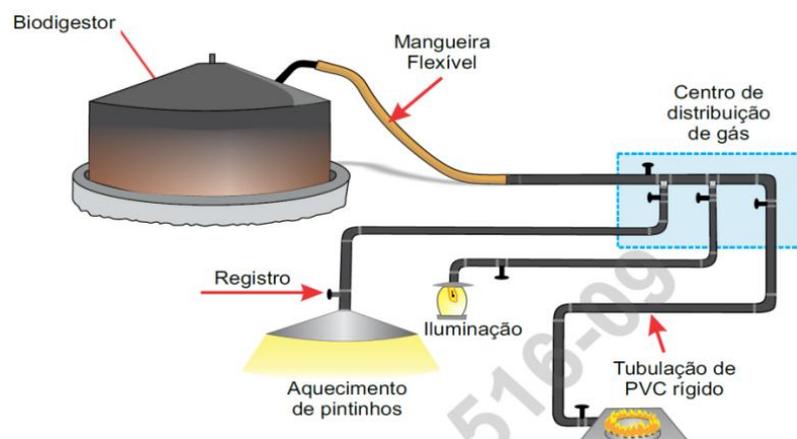


Figura 22- Sistema de distribuição do biogás.
Fonte: JÚNIOR et al, 2006.

Portanto, a construção do biodigestor está finalizada. A Figura 23 mostra como ficaria um biodigestor indiano após a sua implantação.



Figura 23- Biodigestor indiano.
Fonte: JÚNIOR et al, 2006.

3.3 Operação do biodigestor

Para finalizar a metodologia do trabalho, vale ressaltar como ocorre a operação do biodigestor.

Primeiramente, é necessário fazer a coleta dos dejetos. Como foi declarado na seção de dimensionamento do biodigestor, podem-se retirar os dejetos por meio do método da raspagem ou por meio de água pressurizada. Se a técnica utilizada for por raspagem, os dejetos são levados para a caixa de carga por meio de um carrinho de mão, por exemplo. Agora, se for utilizado o método da água, seria necessário fazer uma estrutura para esses dejetos chegarem até a caixa de carga do biodigestor, como mostra a Figura 24.

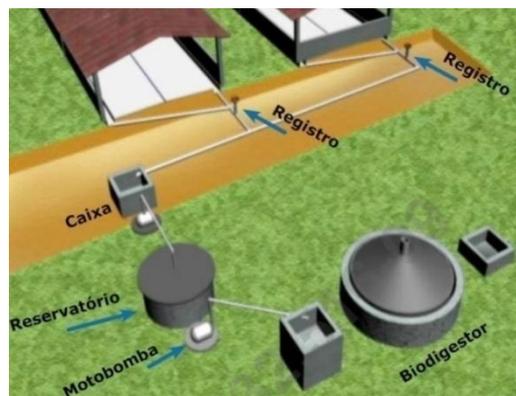


Figura 24- Estrutura realizada para conduzir os dejetos até o biodigestor.
Fonte: JÚNIOR et al, 2006.

Como se pode observar na Figura 24, essa estrutura apresenta uma caixa de alvenaria, construída abaixo do nível do solo, para ficarem armazenados os dejetos

diluídos em água. A parte da tubulação é feita com tubos de PVC, normalmente com 150 mm. Pode-se perceber também, na Figura 24, que essa estrutura apresenta motobombas, que terão a finalidade de conduzir os dejetos. Quando os registros que ficam próximos ao fosso forem abertos, os dejetos serão conduzidos até o reservatório com o auxílio da bomba centrífuga. Ao chegar ao reservatório, a segunda bomba atuará, carregando os dejetos até a caixa de carga do biodigestor.

Como se trata de um biodigestor indiano, o carregamento ocorrerá todos os dias, porém uma vez ao dia. Assim, os registros da estrutura para a condução dos dejetos impedirá a passagem destes para a caixa de carga continuamente.

Ao chegar à caixa de carga, os dejetos são enviados para a câmara de biodigestão, por meio do tubo de carga. Na câmara de biodigestão é que ocorre todo o processo de fermentação, como afirmado durante a revisão bibliográfica deste trabalho. A quantidade de resíduos que é inserido, por dia, na caixa de carga do biodigestor da fazenda da Chácara é de 4000 l, assim, quando essa quantidade chega à câmara de biodigestão, força a saída da mesma quantidade de resíduos, porém já fermentados, para a caixa de descarga, por meio do tubo de descarga. Portanto, como o tempo de retenção dos dejetos bovinos é de 30 dias, quando se completar esse ciclo, toda a carga que estava no interior do biodigestor foi completamente trocada. O material contido na caixa de descarga é levado para utilizar nas lavouras como biofertilizante.

É importante ressaltar que os biodigestores possuem um tempo de partida. Quando os dejetos diluídos em água chegam à câmara de fermentação começa a ação das bactérias anaeróbicas, porém, na primeira utilização do biodigestor, essas bactérias ainda não estão desenvolvidas, justificando a existência do tempo de partida. Portanto, ao colocar a primeira carga no biodigestor, deve-se esperar um tempo para estabilizar a produção de biogás e, só depois disso, começar com o carregamento do biodigestor diariamente. Esse tempo de partida varia de acordo com o tipo de dejetos que o biodigestor é alimentado. Em dejetos suínos, esse tempo costuma ser de 90 dias, já em dejetos bovinos, normalmente, são 60 dias. O tempo de partida dos dejetos bovinos é menor porque estes proporcionam uma rápida proliferação das bactérias metanogênicas, o que gera uma produção de biogás em menor espaço de tempo (DOTTO, 2012).

Para diminuir o tempo de partida, utiliza-se o inóculo, que é um material que já passou pela fermentação, ou seja, pela ação das bactérias anaeróbicas, em outro

biodigestor. Esse material já apresenta as bactérias desenvolvidas, assim, ao ser inserido em um biodigestor que esteja alimentado com a primeira carga, irá acelerar o processo de produção de biogás deste, podendo reduzir, até mesmo, 30 dias do tempo de partida.

Nesta seção, foi apresentado todo o projeto para colocar em prática o funcionamento do biodigestor na fazenda da Chácara. Agora, no próximo capítulo, serão apresentados os custos gerados com a construção e a manutenção do biodigestor, a renda que este pode gerar para a fazenda com a sua produção de biogás e biofertilizante, além de uma estimativa do tempo de retorno do capital investido na construção do biodigestor.

4 RESULTADOS

O objetivo principal deste capítulo é analisar a viabilidade econômica do projeto do biodigestor na fazenda da Chácara. Para isso, são realizados cálculos do fluxo de caixa, *payback*, valor presente líquido e da taxa interna de retorno. Porém, primeiramente, será realizada uma relação da quantidade de biogás e biofertilizante que serão produzidos no biodigestor, uma análise do consumo de energia elétrica da fazenda da Chácara, bem como o custo de investimento para a construção do biodigestor.

4.1 Quantidade de biogás e biofertilizante produzido no biodigestor

A quantidade de biogás produzida está relacionada com o fluxo de dejetos que entra diariamente no biodigestor. Como os dejetos são diluídos em água antes de serem despejados, tem-se uma quantidade de 4000 l, por dia. Porém, para a análise da quantidade de biogás que é produzida, basta o conhecimento, da quantidade de dejetos que são retirados da fazenda diariamente, que é em média 2000 kg. Sabe-se que 25 kg de dejetos bovinos correspondem a 1 m³ de biogás. Assim, com 2000 kg, obtém-se uma quantidade de 80 m³ por dia. Em um mês, portanto, tem-se 2400 m³ de biogás produzido.

O biofertilizante, como fonte de nutrientes para a lavoura, também gera uma economia para os produtores. Sua produção diária depende da quantidade de dejetos que alimenta o biodigestor, da mesma forma que o biogás. Portanto, com

4000 l de dejetos diluídos em água, que são inseridos diariamente no biodigestor, tem-se uma produção de aproximadamente 4000 l de biofertilizante, uma vez que, como já foi dito na metodologia deste trabalho, a mesma quantidade de resíduos que entram no biodigestor é a mesma quantidade que sai, porém a única diferença é que o material que sai já sofreu ação das bactérias anaeróbias, ou seja, já está fermentado, o que o tornou biofertilizante.

4.2 Seleção do gerador

No item acima, observou-se a quantidade de biogás que será produzido no biodigestor projetado para a fazenda da Chácara. Esse biogás será convertido em energia elétrica, para isso, é necessário selecionar um gerador que atenda as necessidades da fazenda. Para dimensionar o gerador, precisa-se realizar um levantamento da potência exigida por cada equipamento presente na fazenda.

Como a fazenda da Chácara é dotada por um laticínio, apresenta equipamentos com potências elevadas, como o tanque de resfriamento de leite, câmara fria e o pasteurizador. Além desses equipamentos, a fazenda possui uma ordenhadeira mecânica e uma picadeira de capim. A Tabela 8 mostra a potência de cada equipamento.

Tabela 8- Potência dos equipamentos da fazenda da Chácara.

Equipamentos	Potência (W)	Quantidade	Potência total (W)
Tanque de resfriamento de leite	3.395	1	3.395
Câmara fria	4.500	1	4.500
Pasteurizador	7.500		7.500
Ordenhadeira mecânica	2.200	1	2.200
Picadeira de capim	2.200	1	2.200
Lâmpadas	60	13	780
Total			20.575

Fonte: Próprio autor.

Com o levantamento das potências de cada equipamento, consegue-se, então, selecionar o gerador adequado para a fazenda. Considerando o caso em que

todos os equipamentos estão ligados simultaneamente, ou seja, o caso em que ocorre a máxima potência, tem-se um valor de 20.575 W ou 20,575 kW de potência requerida pela fazenda. Como medida de segurança, devido a perdas, considera-se um acréscimo de 20% na potência requerida, que resulta em aproximadamente 24,69 kW, ou, se dividir essa potência pelo fator de potência do gerador, que é normalmente 0,8, encontra-se 30,86 kVA. Assim, para atender a essa demanda de potência, adotou-se um grupo motor-gerador com alternador WEG no modelo GTA162AI30 de 37,5 kVA, pois é o valor mais aproximado de potência encontrado comercialmente.

4.3 Consumo de energia gasto na fazenda da Chácara

A fazenda da Chácara é dotada por um laticínio, o que necessita de todo um maquinário apropriado para a fabricação de queijos. Além dos equipamentos da fábrica, a fazenda também possui ordenhadeira mecânica e picadeira de capim. Todos esses equipamentos apresentam um consumo elevado de energia elétrica.

A Tabela 9 mostra o consumo de energia elétrica da fazenda de fevereiro de 2016 até fevereiro de 2017.

Tabela 9- Consumo de energia elétrica da fazenda da Chácara.

Mês/Ano	Consumo KW/h
Fevereiro/2016	3.454
Março/2016	5.010
Abril/2016	3.381
Maio/2016	3.570
Junho/2016	3.505
Julho/2016	3.665
Agosto/2016	3.382
Setembro/2016	5.428
Outubro/2016	3.835
Novembro/2016	3.874
Dezembro/2016	3.920
Janeiro/2017	3.913
Fevereiro/2017	3.950

Fonte: Próprio autor.

Percebe-se, por meio da Tabela 9, que o consumo de energia da fazenda varia, aproximadamente, de 3.000 a 5.000 kWh por mês, obtendo-se uma média, durante fevereiro de 2016 até fevereiro de 2017, de aproximadamente 3.920 kWh por mês. A tarifa de energia elétrica para propriedades rurais, cobrada pela CEMIG, é de R\$ 0,48; assim sendo, o proprietário da fazenda gasta, em média, R\$ 2000,00 por mês com energia.

4.4 Geração de energia elétrica

Para fazer a análise da quantidade de energia elétrica que o biodigestor projetado para a fazenda da Chácara produzirá, é necessário saber a quantidade de biogás que será produzido. Como já foi mencionado neste trabalho, o biodigestor em questão produzirá, em média, 80 m³ de biogás por dia, obtendo 2400 m³ por mês.

A geração de energia depende do poder calorífico do biogás e do rendimento do conjunto motor-gerador, que será utilizado para fazer a conversão do biogás em energia elétrica. Considerando que o biogás tem um elevado teor de metano em sua constituição, estima-se um poder calorífico de 6,5 kWh/m³ e um rendimento do conjunto de aproximadamente 25%.

Tendo em vista que a fazenda da Chácara possui 50 vacas leiteiras e, sabendo que cada uma produz 1 m³ de biogás por dia, é possível obter a quantidade de energia produzida, conforme a Equação 13.

$$\text{Energia elétrica} = PC * E * \eta \quad (13)$$

Onde:

PC: Poder calorífico do biogás em kWh/m³;

E: Quantidade de biogás que cada vaca produz em m³;

η : Rendimento do conjunto motor-gerador.

$$\text{Energia elétrica} = 6,5 * 1 * 0,25 = 1,625 \text{ kWh}$$

Além das vacas leiteiras, a fazenda possui 50 bois de corte, sendo que cada um produz em média 0,6 m³ de biogás por dia. Assim, usando novamente a Equação 13, obtém-se:

$$\text{Energia elétrica} = 6,5 * 0,6 * 0,25 = 0,975 \text{ kWh}$$

Com a Equação 13, foi possível calcular a energia elétrica que cada animal da fazenda produz. Portanto, como cada vaca leiteira produz 1,625 kWh, as 50 vacas leiteiras produzem 81,25 kWh e, como cada boi produz 0,975 kWh, os 50 bois de corte produzem 48,75 kWh, obtendo uma produção total de 130 kWh por dia na fazenda. Assim, em um mês a quantidade de energia gerada é de aproximadamente 3.900 kWh.

Assim sendo, percebe-se, de acordo com a Tabela 9, que essa quantidade de energia gerada pelo biodigestor consegue, quase que totalmente, suprir toda a energia consumida pela fazenda.

4.5 Análise da viabilidade econômica

Este projeto visa avaliar a viabilidade econômica de um sistema alternativo de energia para reduzir o consumo de energia da rede. Serão utilizados índices econômicos para demonstrar a atratividade econômica do projeto.

Neste estudo, que objetiva analisar a viabilidade econômico-financeira da energia adquirida por meio da biomassa, serão calculados o fluxo de caixa, *payback*, o valor presente líquido e a taxa interna de retorno. Para isso, primeiramente, foi realizado o cálculo do custo de investimento para a construção do biodigestor.

4.5.1 Análise dos investimentos para a construção e operação do biodigestor

Inicialmente, para fazer a análise da viabilidade econômica do projeto do biodigestor na fazenda da Chácara, foi feito um orçamento em lojas conhecidas na internet, sendo considerados os valores mais baratos, como mostra a Tabela 10, dos principais equipamentos gastos. A quantidade de material foi estabelecida de acordo com o tamanho do biodigestor projetado.

Na Tabela 10 apresenta também o custo com a mão de obra para a construção do projeto.

Tabela 10- Orçamento realizado para a construção do biodigestor.

Material	Unidade	Quantidade	Preço (R\$)	Total (R\$)
Tijolos	Milheiro	6	250,00	1500,00
Cimento	Saca	50	30,00	1500,00
Areia fina	m ³	5	113,70	568,50
Areia grossa	m ³	3	81,50	244,50
Brita número 2	m ³	5	78,20	391,00
Vergalhão 3/8 de polegadas	m	12	25,60	25,60
Vergalhão de 5 mm	m	24	17,80	17,80
Tubo de ferro galvanizado de 2,5 polegadas	m	4	55,00	220,00
Tubo de PVC de 50 mm	Barra	4	34,00	136,00
Tubo de PVC de 150 mm	Barra	4	119,90	479,60
Mangueira flexível	m	6	41,30	247,80
Gasômetro	Peça	1	5.000,00	5.000,00
				10.330,80
Mão de obra	Dias	6	500,00	3000,00
Total				13.330,80

Fonte: Próprio autor.

Em cima do valor total, com os equipamentos e mão de obra, foi considerado mais 10%, para custos adicionais não contabilizados, como, por exemplo, o frete. Portanto, o valor total para a construção de um biodigestor indiano na fazenda da Chácara foi de R\$14.663,88.

Como o principal objetivo da instalação do biodigestor na fazenda é a economia de energia por meio do biogás produzido, necessita-se, então, de um conjunto motor-gerador para converter o biogás em energia elétrica. Esse conjunto varia o preço de acordo com a sua potência. No caso da fazenda, foi adotado um gerador de 37,5 kVA, como já foi mencionado, que custa R\$ 50.000,00.

O grupo gerador requer constante manutenção para o seu funcionamento. As manutenções representam, de modo geral, 4% do valor do investimento total realizado para construir e operar o biodigestor (ADVFN, 2017). Esse valor será corrigido, a partir do segundo ano de funcionamento, com a inflação média de 6,93% obtida nos últimos anos, segundo o IPCA (Índice de Preços ao Consumidor Amplo) que é o índice oficial do Governo Federal para obter os índices de inflação. Os índices de inflação de 2011 a 2016 são mostrados na Tabela 11 a seguir.

Tabela 11- Índice de inflação.

Ano	Acumulado (%)
2016	6,29
2015	10,67
2014	6,41
2013	5,91
2012	5,83
2011	6,5
Média	6,935

Fonte: ADVFN, 2017.

A Tabela 12 mostra as despesas para a construção do biodigestor e a Tabela 13 a economia gerada pela utilização do biodigestor na fazenda da Chácara no período de 10 anos. Foi considerada, também, a inflação média de 6,93% ao ano para os valores de tarifa de energia.

Tabela 12-Gastos para a construção do biodigestor.

Despesa	Valor
Construção	R\$ 14.663,88
Gerador	R\$ 50.000,00
Projeto e Instalação	R\$ 5.000,00
Total	R\$ 69.663,88

Fonte: Próprio autor.

Tabela 13-Economia gerada com a utilização do biodigestor.

Período (Ano)	Geração (kWh/ano)	Tarifa (R\$/kWh)	Remuneração		Fluxo de Caixa
			Custo	Energia	
0	0	R\$ 0,00	-R\$ 69.663,88	R\$ 0,00	-R\$ 69.663,88
1	46800	R\$ 0,48	-R\$ 2.786,56	R\$ 22.464,00	-R\$ 49.986,44
2	46800	R\$ 0,51	-R\$ 2.978,83	R\$ 24.014,02	-R\$ 28.951,25
3	46800	R\$ 0,55	-R\$ 3.184,37	R\$ 25.670,98	-R\$ 6.464,63
4	46800	R\$ 0,59	-R\$ 3.404,09	R\$ 27.442,28	R\$ 17.573,56
5	46800	R\$ 0,63	-R\$ 3.638,97	R\$ 29.335,80	R\$ 43.270,39
6	46800	R\$ 0,67	-R\$ 3.890,06	R\$ 31.359,97	R\$ 70.740,30
7	46800	R\$ 0,72	-R\$ 4.158,47	R\$ 33.523,81	R\$ 100.105,63
8	46800	R\$ 0,77	-R\$ 4.445,41	R\$ 35.836,95	R\$ 131.497,18
9	46800	R\$ 0,82	-R\$ 4.752,14	R\$ 38.309,70	R\$ 165.054,73
10	46800	R\$ 0,88	-R\$ 5.080,04	R\$ 40.953,07	R\$ 200.927,76

Fonte: Próprio autor.

Os valores supracitados não levam em consideração a economia gerada pela comercialização ou utilização própria do biofertilizante produzido, visto que o proprietário da fazenda da Chácara já utilizava os esterco de animais como fertilizante.

Percebe-se na Tabela 13, que foi considerada uma geração de energia anualmente, equivalente a 46800 kWh, visto que, por mês, o biodigestor tem-se uma geração de 3900 kWh.

Vale ressaltar que o tempo de duração do biodigestor pode ser mais que dez anos, portanto o sistema continuará gerando economia, tornando cada vez mais atrativo este investimento.

4.5.2 Payback

Também conhecido como tempo de retorno de investimento, o *payback* significa o tempo necessário para que o fluxo de caixa acumulado atinja um valor positivo. Apresenta uma boa estimativa da atratividade do investimento, todavia, possui algumas limitações por não levar em consideração reajustes monetários e os riscos envolvidos no investimento. Logicamente, quanto mais rápido for o *payback* mais atrativo será o investimento.

Para o investimento realizado na construção e operação do biodigestor, percebe-se facilmente, a partir da Tabela 13 que o tempo de retorno de investimento

foi de aproximadamente 4 anos. Com a ajuda do *software* Excel foi possível obter o tempo exato do *payback*, que foi de 4 anos e 3 meses.

4.5.3 Valor presente líquido (VPL)

O VPL é outro importante método para análise de investimento. Ele é calculado a partir da diferença entre os custos e remunerações oriundas do projeto. Neste método, os valores do fluxo de caixa são corrigidos para o valor presente, a partir do desconto de uma determinada taxa de juros (NAKABAYASHI, 2015). Para o cálculo do VPL, é utilizado à seguinte Equação:

$$VPL = \sum_{t=0}^n \frac{F_{cn}}{(1+i)^n} - I_0 \quad (14)$$

Onde:

F_{cn} : Fluxo de caixa do projeto no período t;

“i”: Taxa de desconto;

I_0 : Investimento inicial.

A análise do VPL ao utilizar essa equação é simples, quando o valor de VPL apresentar um valor negativo, significa que o investimento não é interessante, do contrário o investimento é atrativo (NAKABAYASHI, 2015).

A taxa de desconto utilizada será a Taxa do Sistema Especial de Liquidação e Custódia (SELIC), descontada do valor da taxa de inflação por se tratar do melhor valor a ser utilizado segundo NAKABAYASHI (2015). O valor atual da taxa SELIC é de 11,15% e a inflação adotada será a mesma utilizada nos cálculos acima de 6,93% (BANCO CENTRAL DO BRASIL, 2017). Portanto a taxa de desconto para o cálculo do VPL será de 4,22%.

A partir das considerações acima e novamente com o auxílio da ferramenta Excel, foi possível calcular o valor do VPL para esse investimento, que foi de R\$ 5.630,74. Percebe-se que o valor é positivo, portanto o investimento mostra-se atrativo.

4.5.4 Taxa interna de retorno (TIR)

A TIR é o método mais utilizado para análise de investimentos. Esta técnica calcula qual a taxa de retorno do investimento, considerando os fluxos de caixa do projeto. Com esta taxa é possível comparar o retorno de um projeto com outros tipos de investimento, como poupança, por exemplo.

Apesar de muito utilizada, a TIR não é recomendada em investimentos onde ocorra mais de uma variação de sinal no fluxo de caixa. Como o projeto deste trabalho não apresenta esta característica, foi possível calcular a TIR no Excel, a partir da sua função homônima no *software*.

O valor calculado para este projeto foi de 24%. Em comparação com a taxa SELIC, que representa a maior atratividade em investimentos conservadores, este projeto é bastante atrativo, visto que a taxa de retorno é bem maior que os 11,15% da SELIC. Vale ressaltar que dificilmente se encontra no mercado financeiro algum tipo de investimento com esta taxa de retorno.

Ao fim da elaboração deste projeto, foi informado ao proprietário da fazenda da Chácara sobre todos os custos e benefícios com a construção e operação do biodigestor. O mesmo se mostrou bastante interessado com o projeto, porém o que torna um pouco inviável ainda é o investimento inicial. Com os financiamentos encontrados hoje em dia, facilita, para os proprietários, a aquisição deste projeto.

5 CONCLUSÃO

Este presente trabalho relatou sobre um projeto de dimensionamento de um biodigestor na fazenda da Chácara, localizada no município de Campo Belo – MG, com o intuito de reduzir os gastos com energia elétrica proveniente das concessionárias, além de aproveitar o biofertilizante para as lavouras.

O interesse na realização deste trabalho surgiu com a preocupação no constante aumento dos custos da energia elétrica, proveniente das concessionárias, surgindo, assim, a ideia das energias renováveis. Como a energia proveniente da biomassa é um assunto pouco referido e que poucos conhecem, realizou-se este trabalho com a intenção de ampliar os conhecimentos nesta, tanto para os leitores quanto para o próprio autor.

Foi realizada uma visita na fazenda Arapé, a qual possui dois biodigestores que conseguem suprir toda a sua demanda de energia, mesmo com seus maquinários de altas potências. Ao conversar com os responsáveis pela fazenda Arapé, foi obtida a informação de que, com a instalação dos biodigestores, este estabelecimento apresenta uma economia de, aproximadamente, R\$ 51.000,00 de energia elétrica, por mês, somente com um dos biodigestores implantados na fazenda. Assim, aumentou ainda mais o interesse em fazer um estudo sobre este assunto.

A ideia de realizar um projeto na fazenda da Chácara foi pelo fato deste local apresentar uma quantidade de animais favoráveis para alimentar o biodigestor com seus dejetos. Outro fator importante, que também contribuiu para o interesse neste trabalho, tanto para o autor quanto para o proprietário da fazenda, é que este estabelecimento possui um laticínio, o qual consome muita energia, encarecendo o valor da conta de energia elétrica.

A metodologia deste trabalho descreveu todo o procedimento de como fazer um projeto de um biodigestor indiano, utilizando os dados da fazenda da Chácara. Além disso, foi explicado como que se constrói tal biodigestor e como é feita a sua operação.

Por fim, foi feita uma análise de como seria os resultados do projeto realizado. O estudo dos resultados realizado implica na utilização dos índices econômicos, como o *payback*, VPL e o TIR. O método *payback* apresentou um tempo de retorno, do investimento realizado na construção do biodigestor, de 4 anos e 3 meses, sendo considerado um tempo bastante atrativo. Este projeto somente seria considerado viável se o VPL fosse positivo, e, de acordo, com os cálculos realizados o VPL atendeu este requisito. Mas, para realmente comprovar se o investimento realizado compensaria, foi necessário o cálculo do TIR. Com este índice, pôde-se perceber que este projeto é bastante atrativo, pois o valor calculado do TIR foi de 24%, que é bem maior que a taxa SELIC, que representa a maior atratividade em investimentos conservadores. Vale ressaltar, então, que dificilmente se encontra no mercado financeiro algum tipo de investimento com esta taxa de retorno.

Desta forma, conclui-se que, mesmo que o investimento para a construção, implantação e manutenção do biodigestor apresente um valor alto, este projeto é um investimento bastante atrativo.

REFERÊNCIAS

- ADMIN. **Histórico do Biogás.** Disponível em : <<http://bgsequipamentos.com.br/blog/hello-world/>>. Acesso em: 20 Mar. 2017.
- ADMIN. **Biodigestores ao Redor do Mundo.** Disponível em : <<http://bgsequipamentos.com.br/blog/biodigestores-ao-redor-do-mundo/>>. Acesso em: 20 Mar. 2017.
- ADVFN. **Indicadores Econômicos.** Disponível em: <<http://br.advfn.com/indicadores/ipca>>. Acesso em: 10 Mai. 2017.
- AMCHAM BRASIL. **Energia de biomassa tem capacidade para abastecer quase um terço do consumo total de eletricidade.** Disponível em: <<http://economia.estadao.com.br/blogs/ecoando/energia-de-biomassa-tem-capacidade-para-abastecer-quase-um-terco-do-consumo-total-de-eletricidade/>>, 2016. Acesso em: 11 Mai. 2017.
- ARAPE. Arapé Agroindústria. Disponível em:<<http://www.arape.com.br/index.php>>. Acesso em: 10 Mai. 2017.
- BANCO CENTRAL DO BRASIL. **Taxa SELIC.** Disponível em: <<http://www.bcb.gov.br/pt-br/#!/n/SELICTAXA>>. Acesso em: 11 Mai. 2017.
- BONA, F. S.; RUPPERT FILHO, E. As microturbinas e a geração distribuída. Encontro de Energia no Meio Rural e Geração Distribuída, v. 5, 2004.
- CANAL RURAL. **IBGE aponta local do maior rebanho bovino do país.** 2016. Disponível em: <<http://www.canalrural.com.br/noticias/jornal-da-pecuaria/ibge-aponta-local-maior-rebanho-bovino-pais-64085>>. Acesso em: 11 Mai. 2017.
- CARON, Carolina Fagundes. Geração de energia no campus a partir da biodigestão anaeróbica. Tese de Doutorado. Universidade Tuiuti do Paraná.
- COLDEBELLA, Anderson. **Viabilidade do uso do biogás da bovinocultura e suinocultura para geração de energia elétrica e irrigação em propriedades rurais. 2006. 74 f.** 2006. Tese de Doutorado. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola)–Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Cascavel-PR, 2006.
- DEGANUTTI, Roberto, PALHACI, Maria do Carmo Jampaulo Plácido, ROSSI, Marco *et al.* **Biodigestores rurais: modelo indiano, chinês e batelada.** In: ENCONTRO DE ENERGIA NO MEIO RURAL, 4., 2002, Campinas. **Anais eletrônicos...** Disponível em: <http://www.proceedings.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=MSC000000022002000100031&lng=pt&nrm=abn>. Acesso em: 20 Mar. 2017.
- DE ARAÚJO, Amanda Viana et al. Uso de Biogás em Máquinas Térmicas. Universidade Federal do Paraná –UFPR, Setor Palotina, 2014.

DE OLIVEIRA, Matias Marchesan. Estudo da inclusão de compartimentos em biodigestores modelo canadense. 2013.

DE OLIVEIRA, Uberdam Andrade. **A importância da utilização de energias renováveis para manutenção dos recursos naturais.** 2014. Disponível em: <<https://medium.com/meio-ambiente/a-importancia-da-utilizacao-de-energias-renovaveis-para-manutencao-dos-recursos-naturais-a9c1ff1ac982>>. Acesso em 10 Mai. 2017.

DE SOUZA, Bruna Barros. BIODIGESTORES: Economia e Sustentabilidade. 2012 Curso de Pós Graduação Latu Sensu em Auditoria, Perícia e Gestão Ambiental, Universidade Redentor, Ponte Nova, 2012.

DO BÚ ARAÚJO, Maria Isabel et al. Dimensionamento de Biodigestores Indiano para a cidade de Campina Grande. Blucher Chemistry Proceedings, v. 3, n. 1, p. 1059-1068, 2015.

DOTTO, Rodrigo Bragança; WOLFF, Delmira Beatriz. Biodigestão e produção de biogás utilizando dejetos bovinos. Disciplinarum Scientia| Naturais e Tecnológicas, v. 13, n. 1, p. 13-26, 2012.

ECYCLE. **Biodigestão de resíduos é opção para grandes quantidades de lixo orgânico.** Disponível em: <<http://www.ecycle.com.br/component/content/article/35-atitude/1338-biodigestao-e-uma-opcao-para-o-lixo-organico-rural-e-urbano.html>>. Acesso em: 19 Mar. 2017.

EMBRAPA. **Biofertilizante.** Disponível em : <<http://www.agencia.cnptia.embrapa.br/gestor/agroenergia/arvore/CONT000fjaakw3q02wyiv809gkz5151b3dhe.html>>. Acesso em: 19 Mar. 2017.

FOGAÇA, Jennifer Rocha Vargas. **Biogás.** Disponível em: <<http://alunosonline.uol.com.br/quimica/biogas.html>>. Acesso em: 20 Mar. 2017.

FREITAS, Eduardo de. **"Importância da Agropecuária Brasileira "**; Brasil Escola. Disponível em <<http://brasilecola.uol.com.br/brasil/a-importancia-agropecuaria-brasileira.htm>>. Acesso em: 11 Mai. 2017.

GASPAR, Rita Maria Bedran Leme et al. Utilização de biogestores em pequenas e médias propriedades rurais, com ênfase na agregação de valor: um estudo de caso na Região de Toledo-PR. 2003.

GESTÃO NO CAMPO. **Modelos de Biodigestores.** Disponível em : <<http://www.gestaonocampo.com.br/biblioteca/modelos-de-biodigestores/>>. Acesso em: 20 Mar. 2017.

ICLEI-BRASIL. Manual para aproveitamento do biogás: volume um, aterros sanitários. ICLEI-Governos Locais pela Sustentabilidade, Secretariado para América Latina e Caribe. Escritório de projetos no Brasil, São Paulo, 2009.

JÚNIOR, LUCAS et al. Construção e Operação de Biodigestores. **Viçosa-MG, CPT**, 2006.

JUNQUEIRA, SLCD. Geração de energia através de biogás proveniente de esterco bovino: estudo de caso na fazenda aterrado. Universidade do Rio Janeiro, Departamento de Engenharia Mecânica DEM/POLI/UFRJ, Rio de Janeiro, 2014.

LEITE, Valderi D. et al. Tratamento de resíduos sólidos de centrais de abastecimento e feiras livres em reator anaeróbio de batelada. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v. 7, n. 2, p. 318-322, 2003.

KARLSSON, Tommy et al. Manual básico de biogás. Lajeado: Univates, 2014.

KISPERGHER, Eduardo Muchiutti. Digestão anaeróbia de efluentes da indústria de alimentos. 2013.

MARIANO, Andreb. **Biodigestores.** Disponível em: <<http://andrebmariano.blogspot.com.br/2011/05/biodigestores.html>>. Acesso em: 20 Mar. 2017.

MIYAWAKI, Bruno. Purificação de biogás através de cultivo de microalgas em resíduos agroindustriais. 2014.

MOREAU, Raul. **A importância da energia nas nossas vidas e a interdependência entre a economia e a energia do país.** Disponível em: <<http://www.oaltotaquari.com.br/portal/2013/03/a-importancia-da-energia-nas-nossas-vidas-e-a-interdependencia-entre-a-economia-e-a-energia-do-pais/>>. Acesso em: 11 Mai. 2017.

NAKABAYASHI, Renny. Microgeração Fotovoltaica no Brasil: Viabilidade Econômica. 2015. Tese de Doutorado. Tese de Mestrado, Instituto de Energia e Ambiente da USP, São Paulo.

OLIVEIRA, Rafael Deleo et al. Geração de energia elétrica a partir do biogás produzido pela fermentação anaeróbia de dejetos em abatedouro e as possibilidades no mercado de carbono. 2009. Tese de Doutorado. UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO.

OLIVER, André de Paula Moniz et al. Manual de treinamento em biodigestão. Salvador: Winrock Internacional, 22p, 2008.

ONUDI. Energia e Mudança Climática. Observatório de Energias Renováveis para a América Latina e o Caribe, 2014.

PALHARES, J.C.P. **Biodigestão anaeróbia de dejetos de suínos: aprendendo com o passado para entender o presente e garantir o futuro.** 2008. Artigo em Hipertexto. Disponível em: <http://www.infobibos.com/Artigos/2008_1/Biodigestao/index.htm>. Acesso em: 19 Mar. 2017.

PEDERIVA, André Cristiano et al. Gestão Ambiental: análise de viabilidade e dimensionamento de um biosigestor para geração de energia elétrica e biofertilizante. Horizontina- RS, 2012. 2ª semana internacional das engenharias da FAHOR.

PERMINIO, Guilherme Bezerra. viabilidade do uso de biodigestor como tratamento de efluentes domésticos descentralizado.

PORTAL BRASIL. **Energia renovável mantém crescimento robusto.** Disponível em: <<http://www.brasil.gov.br/economia-e-emprego/2016/09/energia-renovavel-mantem-crescimento-robusto>>. Acesso em: 11 Mai. 2017.

PORTAL DO BIOGÁS. **Biodigestão Anaeróbia.** Disponível em: <<http://www.portaldobiogas.com/biodigestao-anaerobia/>>. Acesso em: 19 Mar. 2017.

RIZZONI, Leandro Becalet et al. Biodigestão anaeróbia no tratamento de dejetos de suínos. Revista Científica Eletrônica de Medicina Veterinária, v. 9, n. 18, p. 1-20, 2012.

ROHSTOFFE, Fachagentur Nachwachsende. Guia Prático do Biogás: Geração e Utilização. **Ministério da Nutrição, Agricultura e Defesa do Consumidor da Alemanha**, 2010.

ROSEIRA, Marcus Paulo. **Tipos de Biodigestores- Produção Descontínua.** In: CAPACITAÇÃO DE PROFISSIONAIS EM BIOCOMBUSTÍVEIS, 2013. Disponível em: < <http://qgsustentavel.blogspot.com.br/2013/03/tipos-de-biodigestores-producao.html>>. Acesso em: 20 Mar. 2017.

SCHLESINGER, Sergio. **O gado bovino no Brasil.** Rio de Janeiro: FASE, 2010.

SOUZA, J.; SOUZA, S. M. N.; MACHADO, PAULO ROMEU M. Desempenho de um motor ciclo Otto utilizando Biogás como combustível. In: Proceedings. 2004.

SPEECE, R.E. **Anaerobic Biotechnology for Industrial Wastewaters.** 1996.

STACHISSINI, Mariana Gato. Estudo sobre a implantação de um sistema biodigestor em uma propriedade rural em Mamborê-PR. 2014. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

SUZUKI, Ana Beatryz Prenzier et al. Uso de biogás em motores de combustão interna. Pesquisa Aplicada & Agrotecnologia, 2011.

UTEMBERGUE, B. L. et al. Manejo de Dejetos em Confinamento de Bovinos de Corte. III Simpósio de Sustentabilidade e Ciência Animal, 2016. Faculdade de Medicina Veterinária e Zootecnia –FMVZ-USP.

VIEIRA, Isabela. **Dependente de hidrelétricas, Brasil quer mais energias renováveis.** Disponível em: < <http://agenciabrasil.ebc.com.br/geral/noticia/2015-12/dependente-de-hidreletricas-brasil-quer-mais-energias-renovaveis>>. Acesso em: 10 Mai. 2017.

