

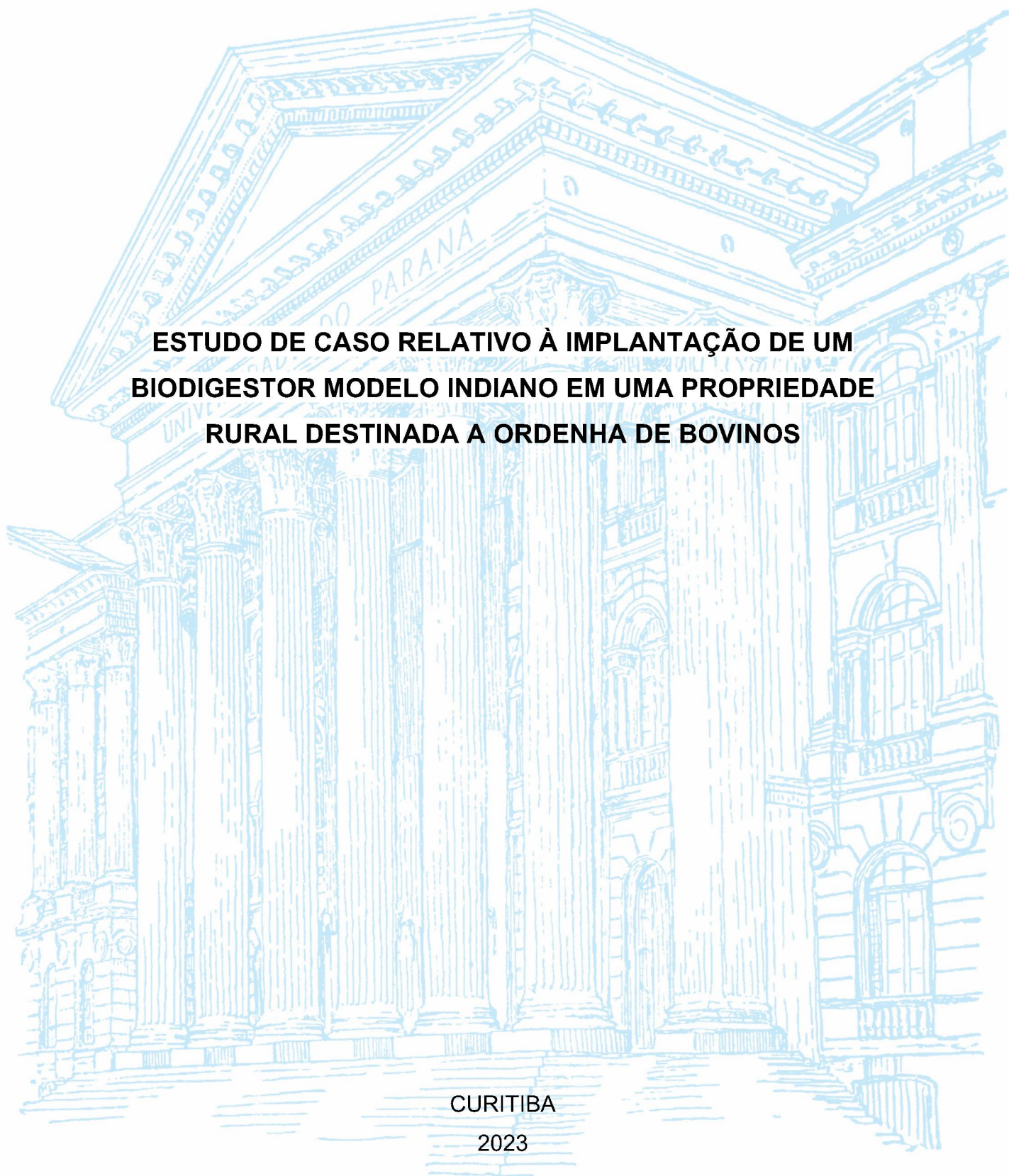
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

GIULIANO PIERRE ESTEVAM

**ESTUDO DE CASO RELATIVO À IMPLANTAÇÃO DE UM
BIODIGESTOR MODELO INDIANO EM UMA PROPRIEDADE
RURAL DESTINADA A ORDENHA DE BOVINOS**

CURITIBA

2023



GIULIANO PIERRE ESTEVAM

**ESTUDO DE CASO RELATIVO À IMPLANTAÇÃO DE UM
BIODIGESTOR MODELO INDIANO EM UMA PROPRIEDADE
RURAL DESTINADA A ORDENHA DE BOVINOS**

Trabalho de Conclusão de Curso (TCC), do curso de MBA em Gestão Estratégica em Energias Naturais Renováveis, do Programa de Educação Continuada em Ciências Agrárias (PECCA), da Universidade Federal do Paraná (UFPR), como requisito parcial para obtenção do certificado de Especialista em Energias Renováveis.

Orientador: Prof. Dr. Alexandre
Amorim Monteiro

CURITIBA

2023

RESUMO

PALAVRAS-CHAVE: Biodigestor, Biogás, Energias Renováveis e Fontes de Energia.

O quadro mundial energético é um fator que afeta diretamente o desenvolvimento humano, a economia global e o meio ambiente. Uma das maiores preocupações contemporâneas está no investimento em fontes de energia renováveis, uma vez que o combustível fóssil se torna oneroso quanto mais próximo do seu esgotamento. O setor agropecuário do Brasil nos últimos anos vem se modernizando e com isto provocando um aumento significativo na demanda de energia. Uma alternativa eficiente à solução energética e elevado volume de resíduos orgânicos é a biodigestão anaeróbia. A partir da fermentação anaeróbia, que ocorre em biodigestores, resultam dois subprodutos: um gás rico em metano denominado biogás e um fertilizante, uma espécie de lodo, que é o resíduo da matéria orgânica depois de fermentada, chamado biofertilizante. Desta forma, os biodigestores podem promover o suprimento de energia e fertilizante para os produtores rurais visto que a posição geográfica do Brasil, entre o Trópico de Capricórnio e a Linha do Equador favorece o clima quente facilitando o uso desta tecnologia. O presente trabalho é um estudo de caso referente a implantação de um biodigestor modelo indiano em uma propriedade rural destinada a ordenha de bovinos, localizada no município de Buritama (SP). Atualmente a propriedade possui 45 unidades que durante o intervalo entre as duas ordenhas diárias permanecem em confinamento em um estábulo pavimentado, o que contribui para a captação dos dejetos. A produção de biogás tem como destino a geração de energia elétrica a partir de um conjunto motogerador de 80kVA. Na propriedade foi construído um biodigestor de 50m³, dimensionado de acordo com a disponibilidade de dejetos e adicionado dois gasômetros de 100m³ para ampliar o volume de biogás disponível. A energia elétrica produzida é aproximadamente 27,65 kWh/dia.

ABSTRACT

KEYWORDS: Biodigestor, Biogas, Renewable Energies and Energy Sources

The global energy picture is a factor that directly affects human development, the global economy and the environment. One of the biggest contemporary concerns is the investment in renewable energy sources, since fossil fuel becomes costly the closer to its depletion. The agricultural sector in Brazil in recent years has been modernizing and with this causing a significant increase in energy demand. An efficient alternative to the energy solution and high volume of organic waste is anaerobic digestion. From the anaerobic fermentation, which occurs in biodigestors, two by-products result: a gas rich in methane called biogas and a fertilizer, a kind of sludge, which is the residue of organic matter after being fermented, called biofertilizer. To promote the supply of energy and fertilizer for rural producers, given that Brazil's geographical position, between the Tropic of Capricorn and the Equator, favors a warm climate, facilitating the use of this technology. The present work is a case study regarding the implantation of an Indian model biodigester in a rural property destined to the milking of cattle, located in the municipality of Buritama (SP). Currently, the property has 45 units that, during the interval between the two daily milkings, remain in confinement in a paved stable, which contributes to the collection of waste. The production of biogas is destined to generate electricity from an 80kVA motor generator set. A 50m³ biodigester was built on the property, sized according to the availability of waste, and two 100m³ gasometers were added to increase the volume of biogas available. The electricity produced is approximately 27,65 kWh/day.

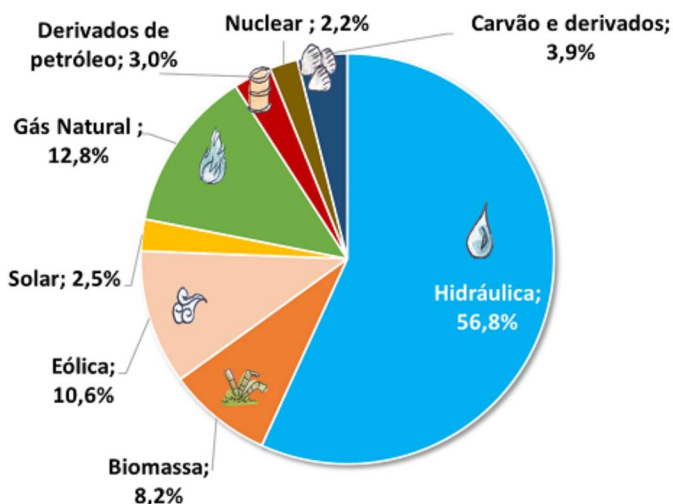
SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	6
1.1 OBJETIVOS	7
1.1.1 Objetivo Geral	7
1.1.2 Objetivo específico	7
1.1.3 Justificativa	7
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	8
2.1 BIOGÁS.....	8
2.2 BIODIGESTÃO ANAERÓBIA.....	10
2.3 BIODIGESTORES.....	11
2.3.1 Biodigestores no Brasil.....	14
2.4 MOTORES DE CICLO OTTO	15
2.5 ENERGIA ELÉTRICA VIA BIOGÁS	16
3 METODOLOGIA	18
4 ESTUDO DE CASO	18
4.1 CARACTERIZAÇÃO DO EMPREENDIMENTO	19
4.2 LAYOUT DO SISTEMA.....	20
4.3 DIMENSIONAMENTO DO BIODIGESTOR	21
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO	25
6 CONCLUSÃO	28
7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	29

1 INTRODUÇÃO

A necessidade de ampliação de atitudes que levam o meio rural a buscar sustentabilidade, visto que os órgãos governamentais têm formulado uma lista de ações necessárias para que o pensamento ecológico deixe de ser empírico para tornar-se uma atitude correta, a pesquisa em fontes alternativas de energia vem tomando espaço crescente na comunidade científica. Como por exemplo, a energia eólica, solar e o biogás, oriundo da biodigestão anaeróbia da biomassa. Aproximadamente 60% (Figura 01) da energia elétrica produzida no Brasil é oriunda de usinas hidrelétricas, que depende do potencial hidrelétrico dos rios. Sabe-se que esse potencial, em sua grande maioria está localizado na região norte do país, onde o relevo predominante é planície, o que significa baixo desnível, ou seja, há muita água, mas pouca energia potencial gravitacional disponível.

Figura.01: Matriz brasileira de energia elétrica, 2021.



Fonte: BEN, 2022; total: 656 TWh

O Brasil, que é um país agro, possui uma grande quantidade de propriedades rurais. Entre essas destacam-se as destinadas à criação de suínos e bovinos para ordenha. Devido a forma com que os animais são abrigados e o tempo que permanecem confinados durante o dia, pode-se coletar grande quantidade de dejetos. Desta forma essas propriedades possuem um enorme

potencial energético ainda muito pouco explorado. O aproveitamento dos dejetos para geração de biogás se inicia com a implantação de biodigestores, que são estruturas físicas utilizadas para armazenar os dejetos e onde ocorre a biodigestão anaeróbica. Um dos fatores que inibem os investimentos com a implantação de biodigestores por parte dos produtores rurais de pequeno e médio porte é a falta de informações precisas relativa à viabilidade econômica do projeto. Baseado neste contexto apresenta-se a motivação desse trabalho.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo Geral

O objetivo geral deste trabalho é apresentar um estudo de caso relativo a implantação de um biodigestor do tipo canadense em uma propriedade rural cuja atividade principal é a ordenha bovina.

1.1.2 Objetivo específico

- a) Demonstrar que a geração de energia elétrica a partir do biogás pode ser uma alternativa à energia elétrica comprada das concessionárias;
- b) Apresentar uma destinação sustentável e ecológica aos dejetos;
- c) Demonstrar que os dejetos podem ser uma alternativa como fonte de renda, pois podem ser utilizados e/ou comercializados como biofertilizante;

1.1.3 Justificativa

O biogás é uma alternativa de fonte renovável que pode ser produzido em propriedades rurais e utilizado na geração de energia elétrica a partir de geradores acoplados a motores de ciclo Otto. O Brasil é um país de vasta extensão agropecuária. Muitas propriedades encontram-se em regiões remotas onde há dificuldade e elevado custo para chegada da energia elétrica. Nesse contexto a possibilidade de ser autossuficiente em energia elétrica e utilizando um combustível que até então era descartado, torna-se a princípio bastante atraente, mas a implantação desses sistemas ainda é realizada a partir de lições

aprendidas. Essa incerteza traz desconfiança ao investidor e aumenta a necessidade de estudos mais precisos. Visando elucidar essas questões foi realizado um estudo referente a implantação de um biodigestor tipo indiano com a finalidade de produzir biogás para geração de energia elétrica, em uma propriedade rural destinada a ordenha de bovinos.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Nesta seção apresenta-se uma revisão bibliográfica a qual dará subsídios para o entendimento e análise dos dados coletados.

2.1 Biogás

O biogás é um subproduto gasoso resultante da biodigestão na ausência de oxigênio. É composto por metano (CH_4), dióxido de carbono (CO_2), hidrogênio (H_2), nitrogênio (N_2) e uma série de outros componentes em menores quantidades, como gás sulfídrico (H_2S), amônia (NH_3), água (H_2O) (EDWIGES; MULLER; MARTINEZ, 2020). De acordo com Bley (2015) em sua composição o biogás é constituído em média por 59% de gás metano, 40% de gás carbônico e 1% de gases-traço, entre eles o gás sulfídrico.

Oliver et al. (2008), define o biogás sendo um gás combustível com a queima de forma limpa e renovável, sendo usado como combustível e fonte de energia alternativa. Os autores ainda citam que seu poder calorífico varia de 5000 a 7000 kcal/m³. É importante salientar que o metano puro tem poder calorífico aproximadamente igual a 12000 kcal/m³, os valores apresentados anteriormente levam em consideração os outros gases que compõe o biogás. Na Tabela a seguir apresenta-se a composição do biogás.

Tabela. 01: Composição do biogás.

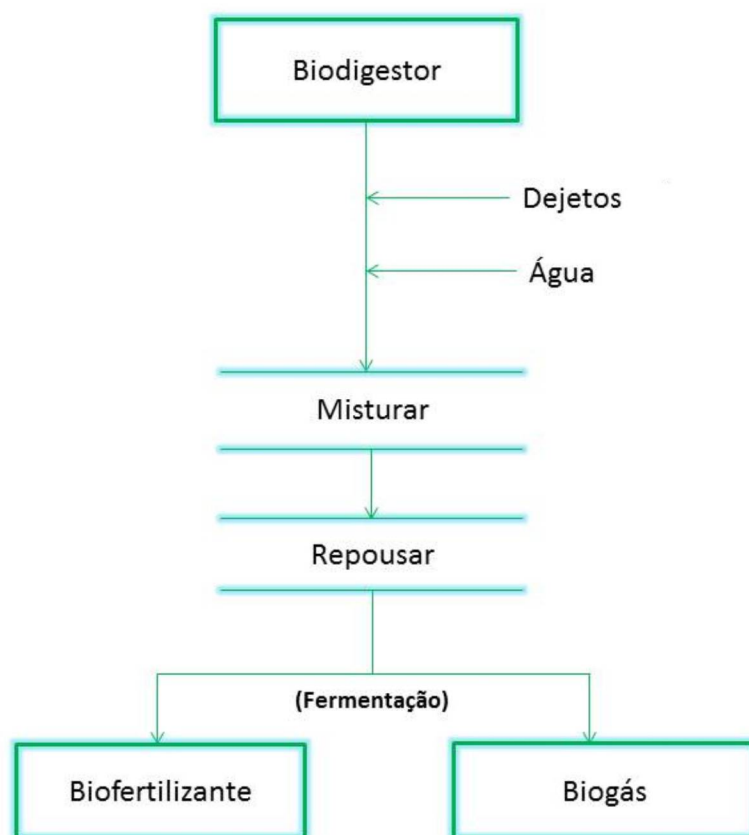
Gás	Símbolo	Concentração no biogás(%)
Metano	CH_4	50-80
Dióxido de carbono	CO_2	20-40
Hidrogênio	H_2	1-3
Nitrogênio	N_2	0,5-3
Gás Sulfídrico e outros	H_2S , CO , NH_3	1-5

Fonte: La Farge, 1979.

O biogás pode ser utilizado de várias maneiras e cada um desses usos exige uma qualidade e um grau de tratamento para o gás (FNR, 2010). Os

possíveis usos em ordem de exigência de qualidade são: combustão direta, aproveitamento térmico, aproveitamento elétrico, injeção na rede de gás e como combustível (FNR, 2010). Ele pode também substituir gases derivados do petróleo tais como: gás de cozinha (GLP) e gás natural (KONRAD et al., 2010). Neste estudo considera-se, o biogás gerado (Figura. 02) a partir de dejetos de bovinos em um biodigestor do tipo indiano.

Figura. 02 - Etapas do processo de biodigestão anaeróbia.



Fonte: Autor.

A perfeita decomposição da matéria orgânica e produção do biogás em quantidade e qualidade suficiente para atender a demanda energética, é necessário monitoramento específico e periódico de fatores que podem interferir na sua operação (EDWIGES; MULLER; MARTINEZ, 2020). Fatores internos como temperatura, pH, alcalinidade, concentração de amônia e os nutrientes influenciam diretamente no processo de digestão anaeróbica, impactando assim na produção de biogás. Também há fatores externos que influenciam no

processo, como o tempo de retenção hidráulica (TDH) e a quantidade de substrato que alimentará o sistema.

A utilização do biogás como recurso energético se deve principalmente ao metano (CH_4), quando puro em condições normais (PTN) de pressão (1 atm) e temperatura (0°), tem um poder calorífico inferior (PCI) de $9,9 \text{ kWh/m}^3$. O biogás com um teor de metano entre 50 e 80% terá um poder calorífico inferior entre $4,95$ e $7,92 \text{ kWh/m}^3$ (COLDEBELLA, 2006)

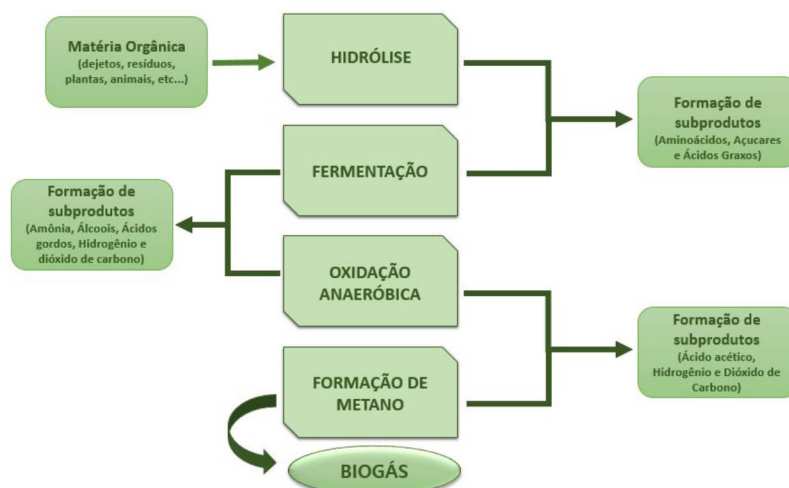
2.2 Biodigestão anaeróbia

A biodigestão anaeróbia consiste basicamente na decomposição de matéria orgânica na ausência de oxigênio. Para sua ocorrência há a necessidade de um determinado tempo de retenção hidráulica (TDH), sob condições ideais de temperatura e homogeneização do substrato. Em função da ausência de oxigênio, microrganismos anaeróbios, bactérias metanogênicas, encontram condições ideais para se proliferar, utilizando como alimento os resíduos orgânicos ali presentes.

O processo de biodigestão anaeróbia envolve a degradação e estabilização da matéria orgânica levando à formação de metano, produtos inorgânicos (dióxido de carbono) e resíduo líquido rico em minerais que pode ser utilizado como biofertilizante (matéria orgânica estabilizada).

As principais vantagens deste tratamento se concentram na baixa demanda por energia, menores requisitos de nutrientes e menor geração de lodo quando comparado aos sistemas aeróbios (EDWIGES; MULLER; MARTINEZ, 2020).

Figura.03: Processo de obtenção do biogás.



Fonte: Quevedo, 2016.

O processo de obtenção do biogás (Figura. 03) necessariamente passa por quatro fases a nível bacteriano, sendo elas hidrólise, acidogênese, acetogênese e metanogênese, sendo que o biogás é obtido na última etapa do processo (ARAÚJO, 2017).

2.3 Biodigestores

O biodigestor anaeróbico, também chamado de reator anaeróbico, trata-se de um sistema fechado que reproduz as condições ambientais adequadas para a realização da decomposição da matéria orgânica por ação de bactérias metanogênicas. A função do biodigestor é acelerar o processo da biodigestão anaeróbica, criando condições favoráveis para manter os micro-organismos anaeróbicos ativos em contato direto com o substrato orgânico (dejetos). Geralmente é equipado com um sistema de entrada de matéria orgânica, um tanque onde ocorre a digestão e um mecanismo para retirada de subprodutos (REIS, 2012).

O sistema é formado por uma câmara fechada onde é inserido o substrato orgânico como fonte de matéria prima, onde passará pelo processo de decomposição anaeróbica.

A produção de biogás em biodigestores é uma técnica antiga, um dos primeiros registros de biodigestores destinados à produção de gás combustível ocorreu na Índia, em Bombaim, no ano de 1857. Ao longo dos anos houve uma evolução do desenvolvimento de modelos de biodigestores, novos materiais

foram utilizados na construção, aperfeiçoamento do designer dos reatores, entre outras características que contribuirão para aumento da eficiência do processo (LIMA, 2021).

Em qualquer projeto de reator anaeróbio o ponto fundamental está relacionado diretamente a velocidade das reações (cinética das reações bioquímicas do processo), ou seja, a eficiência da remoção da carga orgânica do efluente e sua conversão em metano.

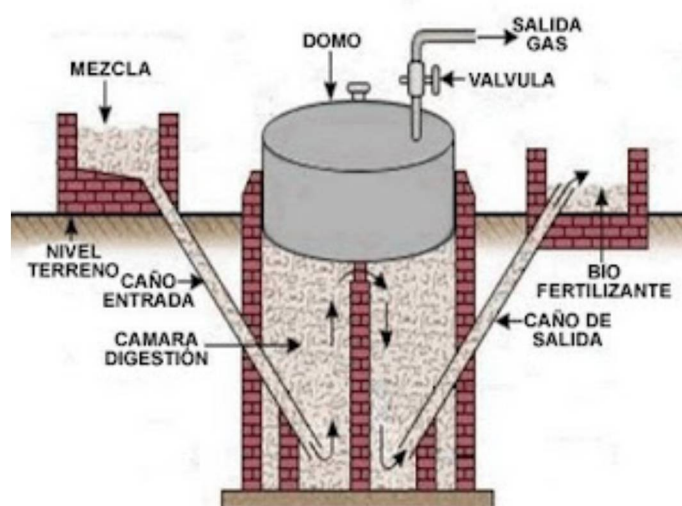
Todo o planejamento e dimensionamento do biodigestor está diretamente relacionado com as características do substrato, o qual irá operar. Assim como, com o custo do projeto, com a disponibilidade dos materiais empregados na construção, entre outros fatores.

Nesse sentido, pode-se destacar alguns modelos de biodigestores.

- Modelo indiano – baixa escala

O modelo indiano é bem caracterizado por possuir uma campânula como gasômetro, a qual pode estar mergulhada sobre a biomassa em fermentação, ou em um selo d'água externo, e uma parede central que divide o tanque de fermentação em duas câmaras.

Figura. 04: Biodigestor modelo indiano.



Fonte: (COELHO, 2012)

O abastecimento desse tipo de biodigestor também deve ser contínuo, ou seja, geralmente alimentado por dejetos (bovinos, suínos, etc) e restos de alimentos com uma certa frequência. Esse tipo de biodigestor pode ser

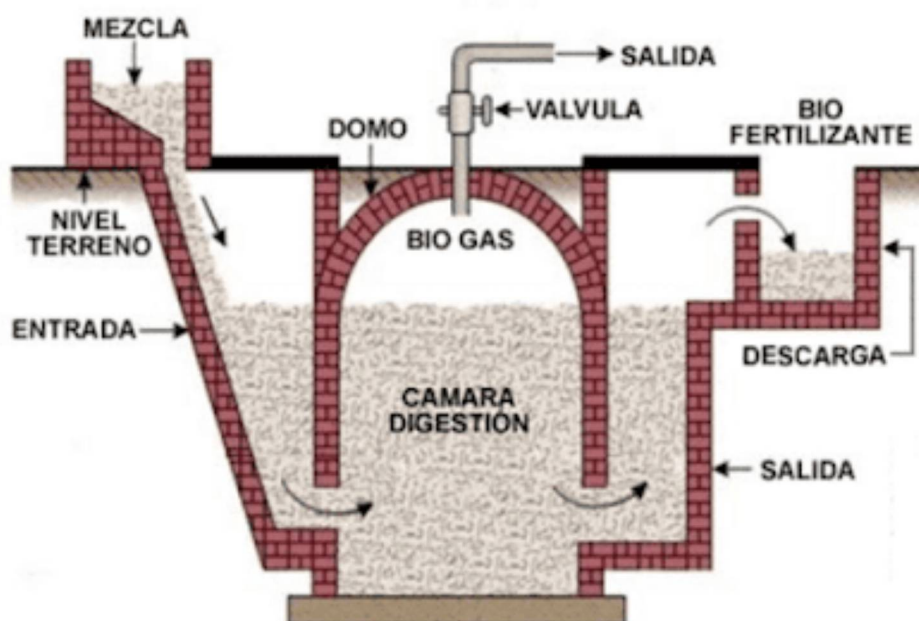
construído e montado com certa facilidade, sendo o único problema o preço do gasômetro de metal que pode encarecer o custo final da construção desse equipamento (COELHO, 2012).

- Modelo chinês – baixa escala

O modelo chinês de biodigestor é formado por uma câmara cilíndrica em alvenaria para a fermentação, com teto abobadado, impermeável, destinado ao armazenamento do biogás.

Este tipo de biodigestor funciona com base no princípio de prensa hidráulica, de modo que o aumento da pressão em seu interior é resultante do acúmulo de biogás, e resulta em um deslocamento de efluente da câmara de fermentação para a caixa de saída, e em sentido contrário quando ocorre a descompressão do equipamento (COELHO, 2012).

Figura. 05: Biodigestor modelo chinês.



Fonte: (COELHO, 2012)

A alimentação desse biodigestor é bem parecida com a do modelo indiano, sendo a matéria orgânica fornecida continuamente, com a concentração de sólidos totais (ST) em torno de 8%, para evitar entupimento do sistema de entrada e facilitar a circulação do material no biodigestor.

- Modelo Canadense – grande escala

O biodigestor canadense é um modelo de biodigestor horizontal que tem uma largura bem maior que a sua profundidade. A característica desse modelo faz com que a sua área de exposição ao sol seja bem maior, logo ocorre uma maior produção de biogás e uma redução nos riscos de entupimento (COELHO, 2012).

Figura. 06: Biodigestor modelo canadense.



Fonte: (COELHO, 2012)

Este modelo utiliza materiais mais simples, sendo a sua cobertura composta geralmente por uma simples lona de plástico maleável, tipo PVC, que infla como um balão com a produção de biogás. Os biodigestores canadenses podem ser construídos enterrados ou não. Além disso, a sua cobertura pode ser retirada com uma certa facilidade para se fazer uma limpeza (COELHO, 2012).

2.3.1 Biodigestores no Brasil

No Brasil, o interesse pelos biodigestores começou com a crise do petróleo da década de 70, quando em 1979, foi construído um dos primeiros biodigestores do país, na Granja do Torto em Brasília. Este projeto serviu para mostrar para a população que é possível instalar uma unidade produtora de biogás com materiais simples e baratos, além disso, incentivou o próprio governo a estimular a instalação de novas unidades em propriedades rurais, na década de

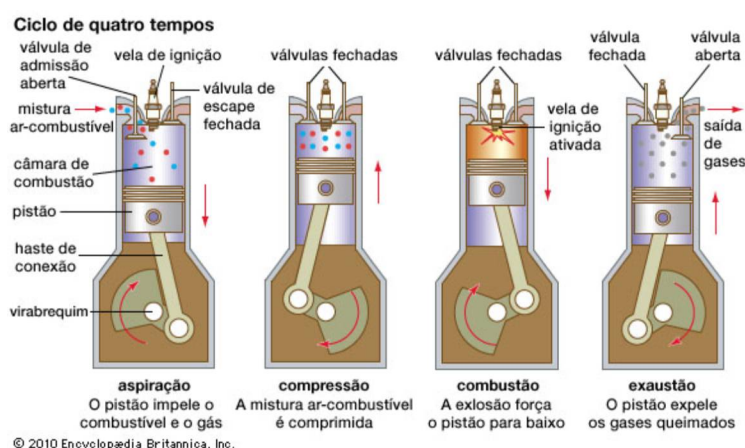
80 com o Programa de Mobilização Energética. Na época, foram instalados cerca de 7 mil Biodigestores nas regiões sul, sudeste e centro-oeste. Este período foi chamado de primeiro ciclo (BGS, 2013).

Aproximadamente nos anos 2000 se deu início ao segundo ciclo dos biodigestores no Brasil impulsionado pelo mercado de créditos de carbono. O crédito de carbono é um incentivo financeiro para aqueles que utilizam tecnologias para reduzir de alguma forma a emissão na atmosfera de gases causadores do efeito estufa, sendo o biodigestor uma destas tecnologias. Estima-se que entre 2005 e 2013, foram instalados no Brasil cerca de 1000 biodigestores considerando os incentivos financeiros dos créditos de carbono (BGS, 2013).

2.4 Motores de Ciclo Otto

Criado em 1876 pelo engenheiro alemão Nikolaus August Otto, o motor ciclo Otto possui alto rendimento energético, uma vez que aproveita a energia da queima do combustível nos cilindros. Para isso, esse motor funciona em quatro tempos, que acontecem de modo sucessivo, que são: admissão, compressão, expansão e exaustão (Figura. 07).

Figura.07: Visão geral da combustão em um motor de ciclo Otto.

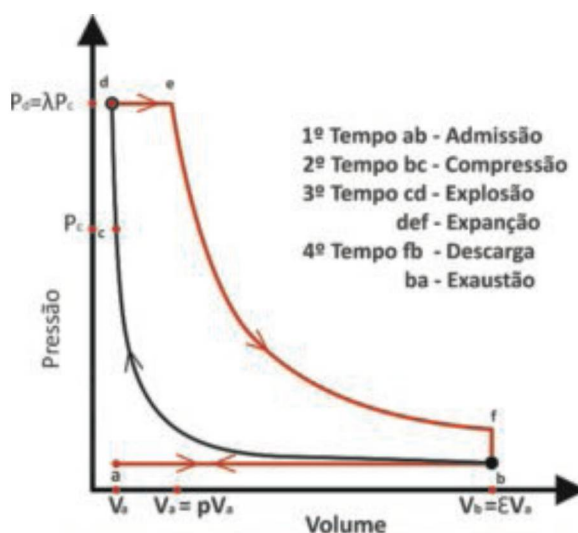


Fonte: <https://educacaoautomotiva.com/2017/07/06/motor-4-tempos-como-funciona/>

Motores de ciclo Otto (Figura. 08), também são conhecidos como de volume constante, o ar e o combustível são aspirados para dentro do cilindro antes da etapa de compressão. A reação de combustão é iniciada a partir de

uma descarga elétrica de elevada tensão, faísca, proveniente da vela de ignição (MARTINS, 2011).

Figura. 08: Ciclo Otto.



Fonte: <https://blog.simplusbr.com/motor-ciclo-otto/tempos-motor-ciclo-otto/>

A eficiência térmica deste tipo de ciclo depende somente da razão de compressão existente, sendo a razão de compressão a relação entre o maior e o menor volume interno do cilindro. Esta razão, se aumentada, possibilita uma maior velocidade de chama devido a pressão e a temperatura da mistura estarem mais elevadas na ignição. Com uma temperatura e pressão da mistura mais elevadas, a energia necessária para a ignição pode ser mais baixa, isso permite um início de combustão mais rápido e fácil. Desta forma, a velocidade da frente de chama se eleva, ocasionando uma velocidade de combustão elevada e o aumento da razão de compressão gera aumento na turbulência da mistura, o que favorece a combustão (MARTINS, 2011).

2.5 Energia elétrica via biogás

A energia elétrica gerada via biogás é obtida a partir do acoplamento de um motor de ciclo Otto adaptado para biogás, acoplado a um gerador de energia elétrica. Esse sistema é denominado conjunto motogerador.

Segundo Bley Junior (2010) o uso de grupos motogerador sendo alimentado por biogás oferece duas finalidades para a energia elétrica produzida:

- Energia elétrica para consumo próprio – A geração própria de energia, principalmente a partir de resíduos, além de questões ambientais, afetam diretamente nas finanças da propriedade. O uso da eletricidade pode ser intensificado para realização de novos trabalhos essenciais e para o aumento da produtividade. Devido a competitividade entre produtores, a redução de custo afeta diretamente o preço do produto final, aumentando a competitividade.

- Venda do excedente da energia elétrica (geração distribuída) – A sobra de energia gerada a partir do biogás, pode ser disponibilizada à rede, através da conexão do sistema gerador com a rede de distribuição, atualmente limitado a um fornecimento de no máximo 300kVA. É importante salientar que a ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica) determina, a partir da norma PRODIST 8, Procedimento de Distribuição 08, os parâmetros elétricos a serem cumpridos pela unidade geradora.

Geração distribuída é definida como sendo o modo de geração de energia elétrica conectada em sincronia com a rede de distribuição, que viabiliza a geração por micro centrais, possibilitando a descentralização do sistema. A geração distribuída pode servir para qualquer fonte renovável de energia elétrica, como eólica, solar, hídrica, geotérmica e no caso da geração de biogás, além dos efeitos energéticos, ainda produz efeitos ambientais, econômicos e sociais (BLEY JUNIOR, 2010).

A venda de energia elétrica, Bley Junior (2010) descreve que pode ser realizada por meio de contratos com concessionárias distribuidoras, em chamadas públicas, reguladas pelas instruções normativas da ANEEL. As Resoluções Normativas 390/2009 e 395/2009 da ANEEL, que fixam as mudanças de critérios ao PRODIST - Procedimentos de Distribuição do setor elétrico permitiram que a energia elétrica em Geração Distribuída gerada com biogás e saneamento ambiental, por geradores de pequeno porte (menores do que 1 MW) e em baixa tensão possa ser conectada em redes de distribuição.

Anteriormente as das modificações do PRODIST, o máximo permitido para geração distribuída, como as Pequenas Centrais Hidrelétricas (PCH), era a

conexão em subestações das redes de transmissão, cuja extensão no Brasil é de cerca de 100 mil quilômetros, ao passo que as redes de distribuição somam cerca de 4,5 milhões de quilômetros. Essa capilaridade das redes de distribuição, agora acessíveis devido à regulação da Geração Distribuída, praticamente assegura a possibilidade de gerar energia elétrica e fornecê-la ao sistema, para as atividades produtoras de animais, industriais ou de subsistência, garantindo assim a comercialização desta energia, o que se constitui passo fundamental para obter a dimensão econômica da energia do biogás (BLEY JÚNIOR, 2010).

O potencial de biogás produzido com os dejetos dos plantéis de animais abatidos no Brasil, aplicados os coeficientes de geração de energia, obteve-se que o volume médio de biogás desses plantéis pode produzir 1,1 TWh/mês de energia elétrica. Isto permite estimar que a geração de energia elétrica do setor da produção de carnes está em torno de 1 TWh/mês, ou 12 TWh/ano. Ou ainda equivale a cerca de 2% do consumo médio brasileiro estimado em 500TWh/ano de energia elétrica. O valor desta geração, pode ser obtido pelo valor de referência da energia elétrica produzida no Brasil, de R\$ 145,00/MWh, que aplicado ao valor potencial da energia com biogás enunciado acima, totaliza R\$ 1,74 bilhões, por ano. Considerando que enquanto 2% do total da energia consumida no Brasil pode soar insignificante, o valor desta energia representa a perda de mais de R\$ 1,7 bilhões por ano, perdidos do setor da produção, na forma de energia elétrica (BLEY JÚNIOR, 2010).

3 METODOLOGIA

A metodologia empregada para a realização deste trabalho é um estudo de caso específico a partir de dados coletados em uma propriedade rural localizada no município de Buritama (SP).

4 ESTUDO DE CASO

Nessa sessão apresenta-se o estudo de caso proposto.

4.1 Caracterização do empreendimento

O empreendimento sob estudo trata-se de uma propriedade rural localizada no município de Buritama (SP). A propriedade conta com 45 bovinos que apresentam um peso médio de 550 kg/bovino. Além disso, os bovinos permanecem aproximadamente dez horas por dia confinados no estábulo, onde produzem os dejetos que podem ser utilizados para a produção de biogás. Devido a quantidade de cabeças de gado, relativamente pequena, optou-se o modelo indiano de biodigestor.

O estábulo, onde os animais ficam confinados no intervalo entre as duas ordenhadas é pavimentado, o que simplifica a recolha dos dejetos.

Figura. 09: Propriedade rural objeto do estudo de caso.



Fonte: <https://www.google.com/maps/place/21%C2%B005'02.1%22S+50%C2%B008'07.9%22W/>

Devido a exigências relativas a controle de qualidade, o estábulo é constantemente lavado manualmente. Os dejetos são conduzidos juntamente com a água, por gravidade até o biodigestor.

Figura. 10: Estábulo da propriedade sob estudo.



Fonte: Autor.

É importante salientar que quantidade de água é um item importante na produção do biogás.

4.2 Layout do sistema

Por questões relativas à higiene e controle de qualidade exigido por compradores da produção de leite, o estábulo deve ser pavimentado e lavado com água corrente constantemente. Para a produção de biogás a água é um elemento necessário, portanto as medidas de controle de qualidade e higiene no local contribuem para o melhor aproveitamento dos dejetos. Na Figura 11 a seguir apresenta-se o *layout* do sistema proposto.

Figura 11: Layout do sistema proposto



Fonte: Autor.

Buscando aumentar a capacidade de geração e não a restringir somente aos horários de ordenha, foi instalado na propriedade dois gasômetros para armazenar o biogás.

4.3 Dimensionamento do biodigestor

Na Tabela 02, constam as expressões e os resultados, do volume de dejetos, da estimativa de produção de biogás, produção de energia elétrica e produção de biofertilizante, necessários para os cálculos do dimensionamento do biodigestor indiano.

Tabela.02: Estimativa da Produção de Biogás e Energia na propriedade objeto do estudo.

	$P_{est} = PV \times VM^*$	$P_{est} = 44 \text{ kg/dia}$
Volume de dejeito produzido	$V_c = \left(\frac{P_{est}}{24h} \right) \times T_c \times n$	$V_c = 825 \text{ kg}$
Estimativa produção de biogás	$G_{biogás} = Q_{dias} \times V_c \times P_{biogás}$	$G_{biogás} = 33 \text{ m}^3$
Estimativa produção de energia	$G_{energia\ elétrica} = G_{biogás} \times C_{energ}$	$G_{energia\ elétrica} = 210,54 \text{ kWh}$
	$Q_{água} = V_c \times T_{água}$	$Q_{água} = 1650 \text{ litros}$
Estimativa da Produção de Biofertilizante	$V = (V_c + Q_{água}) \div 1000$	$V = 2,475 \text{ m}^3$
	$G_{biofert} = V \times 0,8$	$G_{biofert} = 1,98 \text{ m}^3$

Fonte: Autor

sendo:

P_{est} : Produção diária de esterco (kg/dia);

PV : Peso vivo animal (kg);

VM : Valor médio de produção de esterco;

* Considerando que um bovino é capaz de produzir aproximadamente 8 % (0,08) do seu peso vivo em dejetos.

V_c : Vazão diária de dejetos;

$(P_{est}/24 \text{ h})$: Quantidade de dejeito por hora;

T_c : Tempo de confinamento;

n : Quantidade de animais;

$G_{biogás}$: Quantidade de biogás produzido (m^3);

Q_{dias} : Quantidade de dias que os dejetos são recolhidos nos estábulos;

V_C : Quantidade total de dejetos produzido na propriedade (m^3);

$P_{biogás}$: Rendimento de biogás por kg de material orgânico (m^3);

$G_{energia\ elétrica}$: Geração de energia elétrica (kWh/m^3);

C_{energ} : Conversão energética do biogás;

V : vazão total de dejetos (esterco fresco mais água) (m^3);

$Q_{água}$: quantidade de água a ser adicionado (litros);

V_C : quantidade de dejetos total na propriedade (kg);

T_c : Teor de água: bovinos (1:2);

$G_{biofert}$: Quantidade de biofertilizante;

As variáveis que mais influenciam nos resultados, são a quantidade de animais e o tempo de confinamento. Sendo assim, foram realizados vários testes alterando estes dados. Os resultados de alguns destes testes são apresentados na Tabela 03, na qual podemos observar a coerência de seus valores.

Tabela 03: Estimativa da Produção de Biogás e Energia considerando diferentes quantidades de gados e tempo de confinamento.

Quantidades de Cabeças de Gados	45		100		170	
Tempo de Confinamento (h)	10	15	10	15	10	15
Volume de dejetos produzido (kg)	825	1237,5	1833,33	2750	3116,67	4675
Estimativa produção de biogás (m^3)	33	49,5	73	110	124,67	187
Estimativa produção de energia (kWh/m^3)	210,54	315,81	465,74	701,8	795,39	1193,06
Estimativa da Produção de Biofertilizante (m^3)	1,98	2,97	4,36	6,6	7,48	11,22

Fonte: Fonte: SILVA, 2014

A partir dos dados contidos na Tabela 03, fez-se o dimensionamento do biodigestor indiano a ser implantado na propriedade rural sob estudo, Tabela 04.

Tabela 04: Cálculos para a Implantação do Biodigestor Modelo Indiano.

Volume do Biodigestor	$V_{biod} = 1,5 \times G_{biogás}$	$V_{biod} = 49,5 \text{ m}^3$
Diâmetro e altura do biodigestor	50 m ³	$D_i = 3,75$ $h = 4,5$
Volume Total do Biodigestor	$VT_{biod} = \pi \times (D_i)^2 \times H \div 4$	$VT_{biod} = 49,67 \text{ m}^3$
Altura total do biodigestor	$H_r = H_u + P + 0,10$	$H_r = 4,75 \text{ m}$
Volume do gasômetro	$V_g = G_{biogás} \div 2$	$V_g = 16,5 \text{ m}^3$
Diâmetro do gasômetro	$D_g = D_i + 2L + 0,10 \text{ m}$	$D_g = 4,15 \text{ m}$
Altura útil do gasômetro	$H_{ug} = 4 \times V_g / \pi \times D_g^2$	$H_{ug} = 1,22 \text{ m}$
Altura real do gasômetro	$H_{rg} = H_{ug} + P + 0,10 \text{ m}$	$H_{rg} = 1,47 \text{ m}$
Altura da parede divisória	$H_p = H_r - H_{rg} - 0,25 \text{ m}$	$H_p = 3,03 \text{ m}$
Altura real da parede externa do gasômetro	$H_{rpe} = H_{rg} + 0,25 \text{ m}$	$H_{rpe} = 1,72 \text{ m}$
Cano guia	$C_g = 1,00 + H_{rg} + H_{rg}/2$	$C_g = 3,20 \text{ m}$
Volume do tanque de carga	$V_{carga} = V$	$V_{carga} \cong 2,5 \text{ m}^3$
Dimensionamento do tanque de carga	$V_{carga} = L \times C \times H$ $V_{tc} = L \times C \times H$	$L = C = 1,50 \text{ m}$ $H = 1,20 \text{ m}$
Volume do tanque de descarga	$V_{descarga} = G_{biofert}$	$V_{descarga} \cong 2,0 \text{ m}^3$
Dimensionamento do tanque de descarga	$V_{descarga} = L \times C \times H$ $V_{tdesc} = L \times C \times H$	$L = C = 1,41 \text{ m}$ $H = 1,20 \text{ m}$
Cano de descarga	$a^2 + b^2 = c^2$	$a = 4,02 \text{ m}$ $b = 4,38 \text{ m}$ $c = 6,00 \text{ m}$
Cano de carga	$a^2 + b^2 = c^2$	$a = 1,65 \text{ m}$ $b = 3,83 \text{ m}$ $c = 4,16 \text{ m}$

Fonte: Autor

sendo:

 V_{biod} : volume do biodigestor D_i : diâmetro H : altura

VT_{biod} : volume total do biodigestor

H_r : altura real

H_u : altura útil

P : Pressão em coluna d'água (0,15 m)

V_g : Volume do gasômetro (m^3)

D_g : Diâmetro do gasômetro

D_i : Diâmetro interno do biodigestor

L : Espessura da parede interna do selo d'água (0,15 m)

H_{ug} : Altura útil do gasômetro

H_{rg} : Altura real do gasômetro

P : 0,15 (pressão do biogás) – Correção para evitar que a mistura atinja o cano de saída do biogás.

H_p : parede divisória

H_{rpe} : Altura real da parede externa

C_g : comprimento do cano guia

V_{carga} : volume do tanque de carga

L : largura

C : comprimento

V_{tc} : volume do tanque de carga

$V_{descarga}$: volume do tanque de descarga

V_{tdesc} : volume do tanque de descarga

Na Tabela 05, apresenta-se a capacidade de produção em função das dimensões do biodigestor.

Tabela 05 – Capacidade de produção do biodigestor em relação as dimensões do biodigestor.

Capacidade Biodigestor (m^3)	Diâmetro (m)	Altura (m)	Limite Di/h (0,66 – 1,0)
10	2,173	2,70	0,80
20	2,835	3,17	0,89
30	3,214	3,70	0,86
40	3,569	4,00	0,89
50	3,763	4,50	0,83
60	4,079	4,60	0,88
70	4,310	4,80	0,89
80	4,493	5,05	0,88
90	4,678	5,24	0,89
100	4,859	5,40	0,89

Fonte: SILVA, 2014

Para a propriedade sob estudo o volume do biodigestor foi de 49,5 m³. A partir da Tabela 05, tem-se as dimensões do biodigestor. Para o caso sob estudo utilizou-se os valores referentes ao de 50 m³.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

De acordo com os cálculos realizados, para o atual número de unidades de animais disponíveis, o volume do gasômetro do biodigestor deve ser de 16,5m³.

Visando aumentar a energia disponível, optou-se em aumentar a capacidade de armazenamento, utilizando dois gasômetros de 100m³. Na Figura 12 a seguir, apresenta-se os gasômetros utilizados na propriedade sob estudo.

Figura. 12: Gasômetro



Fonte: autor.

O conjunto motogerador é abastecido diretamente pelo biogás dos gasômetros, desta forma tem-se um maior controle da pressão de entrada do combustível no motor.

Na Tabela 06 e na Figura 13, apresentam-se os detalhes técnicos e o conjunto motogerador utilizado. O mesmo foi fabricado pela empresa Biogás.

Tabela 06: Detalhes técnicos.

PRINCIPAL	24h	Fp		CONSUMO	MARCA	MODELO
80kVA	80kVA	0,8		50m ³ /h	MWM	DD229

Fonte: Fabricante

Figura. 13: Motogerador



Fonte: Fabricante.

Com a utilização do gasômetro ganha-se em capacidade de produção de energia elétrica, pois não se restringe apenas ao biogás contido no gasômetro do biodigestor. De acordo com o fabricante a potência do gerador é 80kVA e seu fator de potência é de 0,8. Desta forma o gerador em uma hora de funcionamento pode gerar 6,4kWh.

A partir da tabela 02 tem-se que em uma hora, para a quantidade de animais disponíveis, uma produção de 3,3m³ de biogás, ou seja, para encher os gasômetros (216,5m³) necessita-se de aproximadamente 72 horas.

Levando em consideração que o motogerador consome 50m³/h, com o sistema operando 10 horas/dia, tem-se que:

$$\text{consumo de biogás (10h)} = 50\text{m}^3/\text{h} \times 10\text{h} = 500 \text{ m}^3$$

[1]

Desta forma, com o volume de gás disponível, tem-se a capacidade de abastecer o gerador por 4,32h. Ou seja, praticamente metade do tempo em que os animais ficam no estábulo e o proprietário terá a sua disposição a seguinte quantidade de energia nesse período:

$$\text{Energia elétrica diária disponível} = 6,4 \times 4,32 = 27,65\text{kWh}$$

[2]

Levando em consideração o fornecimento de energia somente para os climatizadores utilizados no período entre as ordenhas diárias, o consumo diário de energia é de

$$\text{consumo diário de energia pelos climatizadores} = 15\text{Kw} \times 10\text{h} = 150\text{kWh}$$

[3]

Ou seja, a energia elétrica disponível nas atuais condições é capaz de suprir 18% do total necessário.

Levando em consideração que o valor do kWh aplicado pela CPFL (concessionária local) para propriedades rurais é de 0,62/kWh para o horário fora de ponta, tem-se que:

$$\text{energia total consumida por mês} = 150\text{kWh} \times 30 = 4500\text{kWh}$$

[4]

$$\text{custo com energia elétrica da concessionária} = 0,62 \times 4500 = \text{R\$ } 2.790,00/\text{mês}$$

[5]

Para determinar o valor economizado mensal, considera-se o valor da energia elétrica produzida a partir do biogás relativo ao valor da energia elétrica empregado pela concessionária local.

$$\begin{aligned} \text{valor da energia elétrica produzida a partir do biogás} &= 27,65 \times 30 \times 0,62 \\ &= 514,29/\text{mês} \end{aligned}$$

[6]

em um ano o valor economizado com energia elétrica é de:

valor economizado por ano = $12 \times 514,29 = \text{R\$ } 6.168,00$
[7]

Com os resultados obtidos verificar-se que para esse cenário a redução no valor pago pela energia elétrica foi de apenas 18%, o que não é muito significativo em vista do investimento empregado. O que pode ser feito para a melhora de desempenho seria aumentar a capacidade dos gasômetros, inicialmente. Salienta-se que a capacidade do estábulo é para 150 animais, o que aumentaria consideravelmente a quantidade de dejetos disponível e consequentemente o volume de biogás produzido. Mas salienta-se que para essa quantidade de animais um novo cálculo deve ser realizado para as dimensões do biodigestor.

6 CONCLUSÃO

A partir do estudo realizado verificou-se que o biogás se apresenta como uma alternativa a autossuficiência em termos de geração de energia elétrica. O custo da energia elétrica é um importante elemento no custo de produção. O que leva ao aumento do preço do produto final, podendo afetar sua competitividade no mercado. Destaca-se que o biogás é um dos produtos obtidos no processo, tem-se também o biofertilizante, que pode ser usado na propriedade ou comercializado.

Diante do investimento inicial verificou-se que a quantidade de energia produzida não supri a demanda total. A economia gerada foi em torno de 18%, mas não se pode levar em consideração somente esse fator. Existe o ganho ambiental e o que pode ser economizado com fertilizantes para o pasto.

Como trabalhos futuros, sugere-se fazer um estudo completo relativo a viabilidade econômica levando em consideração a depreciação, custo de manutenção, tempo de retorno, valor presente líquido e taxa interna de retorno.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BALANÇO ENERGÉTICO NACIONAL (BEN). Ministério da Minas e Energia. Empresa de Pesquisa Energética. 2022.

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

BGS Equipamentos para biogás. **História do biogás**. Disponível em: <<https://www.bgsequipamentos.com.br/historia-do-biogas/>>. Acessado em: março de 2023.

BLEY JÚNIOR, C. **Curso de Atualização em energias do biogás**. Módulo I - Introdução: Objetivo e Contexto. [S.l]. [s.n]. 78 p. 2010.

BLEY, Cícero Jr. **Biogás - a energia invisível**, 2ª ed. rev. e ampl., Editora Atol Estúdio, 2015.

COELHO, P. Biodigestores Contínuos e de Batelada: Funcionamento e Vantagens. 2012. <https://www.engquimicasantosp.com.br/2012/07/biodigestores.html>. Acessado 20/03/2023.

COLDEBELLA, A. SOUZA, S. SOUZA, J. KOHELER, A. Viabilidade da cogeração de energia elétrica com biogás da bovinocultura de leite. An. 6. Enc. Energ. Meio Rural 2006

EDWIGES, T; MULLER, R; MARTINEZ, D. G. **Digestão anaeróbia: características do substrato, principais fontes e etapas da produção de biogás**. GEF Biogás Brasil, 2020.

EDWIGES, T; MULLER, R; MARTINEZ, D. G. **Digestão anaeróbia: características do substrato, principais fontes e etapas da produção de biogás**. GEF Biogás Brasil, 2020.

FNR - Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe. **Guia Prático do Biogás: Geração e Utilização**. Ministério da Nutrição Agricultura e Defesa do Consumidor da Alemanha. Gülzow, Alemanha. 2010. Disponível em: <<https://antigo.mdr.gov.br/images/stories/ArquivosSNSA/probiogas/guia-pratico-do-biogas.pdf>>. Acessado em: março de 2023.

KONRAD, O.; HEBERLE, A. N. A.; CASARIL, C. E.; KAUFMANN, G. V.; LUMI, M.; DALL'OGGIO, M.; SCHMITZ, M. Avaliação da Produção de Biogás e Geração de Metano a partir de Lodo de Estação de Tratamento de Efluentes e Glicerina Residual. **Revista Destaques Acadêmicos**, v. 2, p. 49-55, 2010.

LA FARGE, B. **Le Biogaz – Procèdes de Fermentation Méthanique**. Paris, Masson, 1979.

LIMA, Q. H. Biodigestor - Modelos e configurações. <https://energiaebiogas.com.br/biodigestor-modelos-e-configuracoes>. 2021. Acessado 20/03/2023.

MARTINS, J. Motores de combustão interna. Minho, Portugal: Pubindústria. 2011.

OLIVER, A. P. M. *et al.* Manual de Treinamento em Biodigestão. Bahia, 2008.

QUEVEDO, R. T. Biogás. <https://www.infoescola.com/combustiveis/biogas/> 2016. Acessado 20/03/2023.

REIS, A. S. **Tratamento de resíduos sólidos orgânicos em biodigestor anaeróbio**. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal de Pernambuco (UFPE), 2012. 79f.

SANTOS, P. **Guia Técnico de Biogás**. CCE – Centro para a Conservação de Energia, Portugal, 2000.

SILVA, D. H. Produção Sustentável: conhecimento e viabilidade para implantação de biodigestores operando com dejetos de origem animal. 75f. Monografia (Graduação em Tecnologia em Biocombustíveis). Faculdade de Tecnologia de Araçatuba, Araçatuba, SP. 2014.

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