

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA  
"JÚLIO DE MESQUITA FILHO"

FACULDADE DE ENGENHARIA DE ILHA SOLTEIRA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

Edson José Franco dos Santos

**Análise de investimento para geração de energia com  
biogás proveniente de resíduos sólidos de origem animal**

**Brasil**

**2018**

Edson José Franco dos Santos

## **Análise de investimento para geração de energia com biogás proveniente de resíduos sólidos de origem animal**

Trabalho de graduação apresentado à Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira - UNESP como parte dos requisitos para conclusão do curso de graduação em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Dionízio Paschoareli Júnior

Brasil

11 de Janeiro de 2018

# Resumo

O biodigestor transforma o dejetos animal em biofertilizante, que aduba o solo, e em biogás que pode ser usado para produção de energia, como consequência retira gases de estufa da atmosfera e reduz a poluição do solo e das águas. O objetivo desse trabalho é analisar a viabilidade econômica para a construção de um biodigestor para geração de energia elétrica em três propriedades rurais no interior do Estado de São Paulo. Foi utilizada a metodologia do Departamento de Agricultura dos Estados Unidos para calcular a capacidade de geração de biogás produzida por cada rebanho nas propriedades rurais. A partir do volume de biogás produzido foi dimensionado um biodigestor utilizando o modelo da EMBRAPA e a geração de energia elétrica foi projetada para a queima do metano em um motor Diesel acoplado à um gerador. A análise econômica foi feita utilizando o método da taxa interna de retorno onde o investimento inicial são os custos da construção do biodigestor, os custos para a geração e distribuição de energia, e os custos de manutenção da planta de biogás. As receitas são a utilização do biofertilizante como adubo e o desconto na conta de energia elétrica da propriedade. Na primeira análise obteve-se uma TIR de 14,84% para a propriedade 1, 6,88% para a propriedade 2 e 3,09% para a propriedade 3. Em uma segunda análise utilizou-se o dimensionamento da propriedade 1 nas propriedades 2 e 3 e obteve-se uma TIR de 18,46% e 3,91% respectivamente. Da primeira análise apenas a primeira propriedade teve um investimento viável. Para as propriedades 2 e 3 observou-se que a capacidade de geração de energia era muito maior que a demanda energética das propriedades resultando assim em um superdimensionamento das plantas de biogás e consequentemente um custo muito elevado, sendo que o excedente de energia produzido não era revertido em receitas. Aplicando um dimensionamento mais próximo da demanda energética houve um aumento na TIR para as propriedades 2 e 3 sendo que a propriedade 2 obteve um investimento viável, com retorno econômico a partir do quinto ano. Nos dois casos a propriedade 3 não obteve retorno econômico ao longo da vida útil. Conclui-se que para uma análise de investimento para o uso do biogás deve-se basear o dimensionamento do biodigestor em função da demanda energética da propriedade, para que não haja um super dimensionamento baseado na capacidade de geração de energia, pois o excedente produzido não pode ser transformado em receita.

**Palavras-chave :** Biogás. Biodigestores. Geração de energia.

# Abstract

The biogas digester transforms the animal manure into biofertilizer that fertilizes soil and into biogas that can be used for energy generation, and as a consequence removes greenhouse gases from the atmosphere, reducing soil and water pollution. The objective of this work is to analyze the economic viability for the construction of a biodigester for electricity generation in three rural properties. The United States Department of Agriculture methodology was used to calculate the biogas production capacity of each herd on the farms. From the volume of biogas produced, a biogas digester was designed using the EMPBRAPA model and the generation of electric energy was engineered for the burning of methane in a diesel engine coupled to a generator. The economic analysis was done using the internal rate of return (IRR) method where the initial investment are the costs of the construction of the biogas digester, and the costs of energy generation and distribution, and the annual costs are the maintenance costs of the biogas plant. The revenues are the use of the biofertilizer as fertilizer and the discount in the electricity bill of the property. In the first analysis yielded an internal rate of return of 14,84 % for facility 1, 6.88 % for the facility 2, and 3.09 % for the facility 3. In a second analysis we used the sizing of property 1 on facilities 2 and 3 and obtained a TIR of 18.46 % and 3.91 % respectively. From the first analysis only the first facility had a viable investment, for facilities 2 and 3 it was observed that the power generation capacity was much higher than the energy demand of the properties resulting in an oversizing of the biogas plants and consequently a elevated cost, and the surplus energy produced was not reverted to revenues. Applying a sizing closer to the energy demand, there was an increase in IRR for properties 2 and 3, and property 2 obtained a viable investment, with economic return from the fifth year of operation, in both cases property 3 did not obtain an economic return to the over the life of the investment. The analysis of investment for the use of biogas should be based on the sizing of the biodigester according to the energy demand of the property, so that there is no over-sizing based on the capacity of generation of energy, because the exceeding produced can not be turned into revenue.

**Keywords:** Biogas. Biodigesters. Power generation.

# Lista de ilustrações

Figura 1 – Representação esquemática de um biodigestor modelo indiano . . . . .	12
Figura 2 – Representação esquemática de um biodigestor modelo chinês . . . . .	12
Figura 3 – Representação esquemática de um biodigestor modelo canadense . . . .	13
Figura 4 – Pressão parcial do vapor d'água no biogás . . . . .	20
Figura 5 – Taxa Interna de Retorno para a propriedade 1 . . . . .	38
Figura 6 – Taxa Interna de Retorno para a propriedade 2 . . . . .	38
Figura 7 – Taxa Interna de Retorno para a propriedade 3 . . . . .	39

# Lista de tabelas

Tabela 1 – Construção do biodigestor . . . . .	17
Tabela 2 – Dados fornecidos sobre a propriedade 1 . . . . .	24
Tabela 3 – Produção de biogás e dimensões do biodigestor para a propriedade 1 .	25
Tabela 4 – Dados fornecidos sobre a propriedade 2 . . . . .	26
Tabela 5 – Produção de biogás e dimensões do biodigestor para a propriedade 2 .	27
Tabela 6 – Dados fornecidos sobre a propriedade 3 . . . . .	28
Tabela 7 – Produção de biogás e dimensões do biodigestor para a propriedade 3 .	29
Tabela 8 – Parâmetros para seleção do gerador . . . . .	29
Tabela 9 – Parâmetros para seleção do motor . . . . .	30
Tabela 10 – Parâmetros termodinâmicos do metano e condições ambientes . . . . .	30
Tabela 11 – Capacidade de geração de energia para cada propriedade . . . . .	31
Tabela 12 – Construção do biodigestor para a propriedade 1 . . . . .	32
Tabela 13 – Construção do biodigestor para a propriedade 2 . . . . .	33
Tabela 14 – Construção do biodigestor para a propriedade 3 . . . . .	34
Tabela 15 – Custo para geração de energia . . . . .	35
Tabela 16 – Custos para ligar à rede de distribuição . . . . .	35
Tabela 17 – Produção anual de biofertilizantes . . . . .	36
Tabela 18 – Receita pela geração de energia . . . . .	36
Tabela 19 – Receitas totais para cada propriedade . . . . .	37
Tabela 20 – Receitas totais para cada propriedade . . . . .	37
Tabela 21 – Taxa Interna de Retorno . . . . .	37
Tabela 22 – Investimento da propriedade 1 aplicado nas propriedades 2 e 3 . . . .	40
Tabela 23 – Dejeito de gado para produção de leite . . . . .	45
Tabela 24 – Dejeito de gado de corte em confinamento . . . . .	45
Tabela 25 – Dejeito de suínos . . . . .	45
Tabela 26 – Produção máxima de metano $B_o$ por VS . . . . .	46

# Lista de abreviaturas e siglas

ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica.
CNTP	Condições normais de temperatura e pressão.
GEE	Gases de Efeito Estufa.
kWh	Quilowatt-hora.
TIR	Taxa Interna de Retorno.
MDL	Mecanismo de Desenvolvimento Limpo.

# Lista de símbolos

$C_{kwh}$	Custo do kWh.
$CSP$	Concentração de sólidos produzidos no biodigestor.
$C_{dis,ano}$	Custo anual da disponibilidade.
$Desconto_{kw}$	Desconto na conta de energia elétrica.
$E_{consumida,ano}$	Energia consumida anualmente pela propriedade.
$E_{CH4,ano}$	Energia que o metano pode fornecer por ano.
$E_{CH4,dia}$	Energia que o metano pode fornecer por dia.
$E_{CH4,mês}$	Energia que o metano pode fornecer por mês.
$E_{kWh,ano}$	Energia em kWh que o metano pode fornecer em um ano.
$E_{kWh,dia}$	Energia em kWh que o metano pode fornecer em um dia.
$E_{kWh,mês}$	Energia em kWh que o metano pode fornecer em um mês.
$FDD$	Fluxo Diário de Dejetos.
$FV$	Valor residual do bem.
$H_{u,cntp}$	Entalpia de combustão do metano na CNTP.
$H_{u,t}$	Entalpia de combustão do metano nas condições de trabalho.
$L$	Comprimento do biodigestor.
$PC_{anual}$	Porcentagem de consumo suprida pela geração.
$P_{c,metano}$	Potência de combustão do metano.
$P_{gerador}$	Potência do gerador.
$P_i$	Potência para cada equipamento $i$ .
$P_{motor}$	Potência do motor.
$P_{p,motor}$	Potência de projeto do motor.
$P_{total}$	Potência total utilizada na propriedade.



$PMT_1$	Valor da receita anual.
$PMT_2$	Valor do custo anual.
$PV$	Valor do investimento inicial.
$PV_1$	Valor presente líquido.
$p_{ambiente}$	Pressão ambiente.
$p_{CH_4,CNTP}$	Pressão do metano na CNTP.
$p_{CH_4,t}$	Pressão do metano nas condições de trabalho.
$p_{planta}$	Pressão da planta de biogás.
$p_t$	Pressão de trabalho.
$p_{vapor}$	Pressão de vapor d'água.
$r$	Raio da seção circular do biodigestor.
$R_{kwh,ano}$	Receita anual da geração de energia.
$T_{CH_4,CNTP}$	Temperatura do metano na CNTP.
$T_{CH_4,t}$	Temperatura do metano nas condições de trabalho.
$V_{total}$	Volume total do biodigestor.
$VD_i$	Volume de dejetos produzido diariamente para cada tipo $i$ de rebanho.
$VT_{diário}$	Volume total de dejetos produzidos diariamente por todos os rebanhos.
$w$	Largura da lona do biodigestor.
$\eta_{gerador}$	Eficiência do gerador.
$\eta_{motor}$	Eficiência do motor.
$\rho_{CH_4,CNTP}$	Densidade do metano nas condições normais de temperatura e pressão.
$\rho_{CH_4,t}$	Densidade do metano nas condições de trabalho.

# Sumário

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>11</b>
<b>1.1</b>	<b>Biodigestores</b>	<b>11</b>
<b>1.2</b>	<b>Geração de energia elétrica</b>	<b>13</b>
<b>2</b>	<b>PARÂMETROS PARA A ANÁLISE DE INVESTIMENTO</b>	<b>15</b>
<b>2.1</b>	<b>Propriedades Rurais</b>	<b>15</b>
<b>2.2</b>	<b>Produção de Biogás</b>	<b>15</b>
2.2.1	Biodigestor	16
2.2.2	Construção do biodigestor	17
<b>2.3</b>	<b>Geração de energia</b>	<b>18</b>
2.3.1	Seleção do motor e gerador	18
2.3.2	Produção de energia	18
<b>2.4</b>	<b>Receitas</b>	<b>21</b>
2.4.1	Energia Elétrica	21
<b>2.5</b>	<b>Despesas</b>	<b>22</b>
<b>2.6</b>	<b>Análise do retorno econômico</b>	<b>22</b>
2.6.1	Taxa Interna de Retorno	22
<b>3</b>	<b>CÁLCULO DA TAXA INTERNA DE RETORNO</b>	<b>24</b>
<b>3.1</b>	<b>Propriedade 1</b>	<b>24</b>
3.1.1	Produção de Biogás e Biodigestor	25
<b>3.2</b>	<b>Propriedade 2</b>	<b>25</b>
3.2.1	Produção de Biogás e Biodigestor	26
<b>3.3</b>	<b>Propriedade 3 :Criação de suínos</b>	<b>27</b>
3.3.1	Produção de Biogás e Biodigestor	28
<b>3.4</b>	<b>Seleção do conjunto motor-gerador</b>	<b>29</b>
<b>3.5</b>	<b>Consumo de biogás e produção de energia</b>	<b>30</b>
<b>3.6</b>	<b>Análise do retorno do investimento</b>	<b>31</b>
3.6.1	Custos	31
3.6.2	Receitas	36
3.6.3	Taxa Interna de Retorno	36
<b>3.7</b>	<b>Discussão</b>	<b>39</b>
<b>4</b>	<b>CONCLUSÕES</b>	<b>41</b>
	<b>REFERÊNCIAS</b>	<b>43</b>

<b>APÊNDICES</b>	<b>44</b>
------------------	-----------

<b>APÊNDICE A – TABELAS DE CARACTERÍSTICAS E PRODU- ÇÃO DE DEJETOS . . . . .</b>	<b>45</b>
--	-----------

# 1 Introdução

Desde a década de 1970 o Brasil e o mundo tiveram grandes aumentos populacionais e com isso houve uma maior demanda para produção de alimentos e de energia.

Uma das consequências para a maior demanda de alimentos foi o aumento de rebanhos para a produção de carne, leite e ovos; e com isso houve também uma maior produção de dejetos por parte desses animais. O resíduo sólido animal possui uma grande quantidade de matéria orgânica, porém um manejo mal executado pode acarretar em problemas ambientais como poluição de rios e proliferação de doenças (HOGAN et al., 1993).

Outro fator a ser considerado é a emissão de gases de efeito estufa (GEE), no qual os resíduos sólidos produzem o biogás que contém o metano como gás de maior concentração. O metano possui um impacto 23 vezes maior no efeito estufa do que o gás carbônico ( $\text{CO}_2$ ), e têm um alto poder calorífico e pode ser usado como combustível para a produção de energia elétrica ou térmica (MOMBACH et al., 2016).

Desde a adoção do Protocolo de Quioto e do Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL), o Brasil adotou políticas públicas para o tratamento de resíduos sólidos e a geração de energia elétrica utilizando biogás, assim umas das alternativas para solução do problema ambiental gerado pelos dejetos animais, e para diversificação da matriz energética brasileira, é a biodigestão de resíduos sólidos para geração de biogás e seu uso para produção de energia (BELCHIOR; MATIAS, 2009).

## 1.1 Biodigestores

O biodigestor é uma câmara fechada onde ocorre a fermentação anaeróbica da matéria orgânica realizada por bactérias. O resultado dessa decomposição é o biogás e o biofertilizante rico em potássio, nitrogênio e fósforo que pode ser usado como adubo.

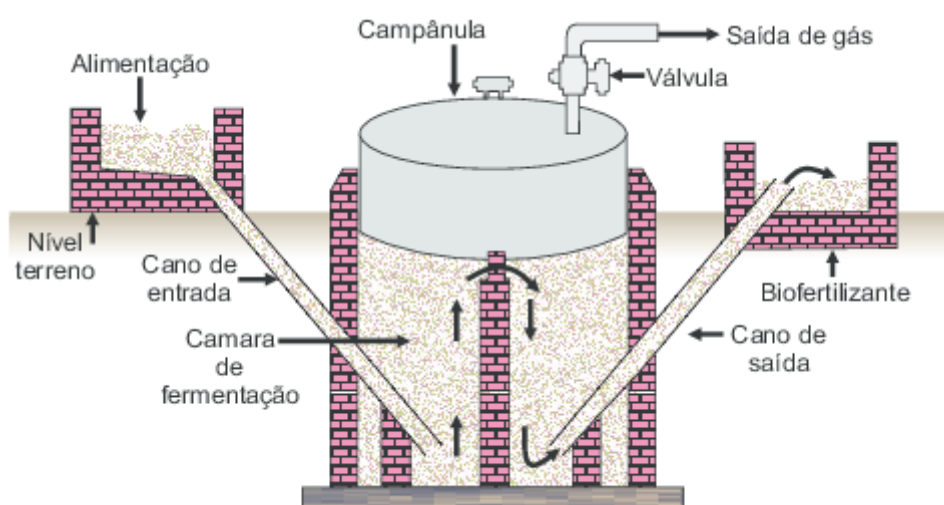
Os biodigestores mais comuns para uso em pequenas propriedades rurais são os modelos indiano, chinês e o canadense, esse também chamado de biodigestor de fluxo contínuo e dentre os três é o que apresenta menos complexidade de construção e a melhor relação custo-benefício para grandes volumes de biogás (KUNZ; HIGARASHI; OLIVEIRA, 2005)

Os modelos indiano e chinês são muito parecidos, sendo que a única diferença significativa é a cúpula de armazenamento de biogás, onde no modelo chinês a cúpula é fixa e construída em alvenaria e no modelo indiano a cúpula é móvel e é de metal. Ambos os modelos são construídos em alvenaria e possuem o mesmo processo de biodigestão.

Dentro dos tanques dos biodigestores há divisórias que os dividem em câmaras, sendo que a primeira câmara recebe a carga de dejetos por uma tubulação exterior ligada a um tanque de carregamento. A biodigestão ocorre na primeira câmara onde o biogás formado é armazenado na cúpula de armazenamento. Conforme a primeira câmara enche, a matéria orgânica já digerida é forçada a passar para a segunda câmara onde é empurrada para caixa de coleta ou de descarga (BARRERA, 1993).

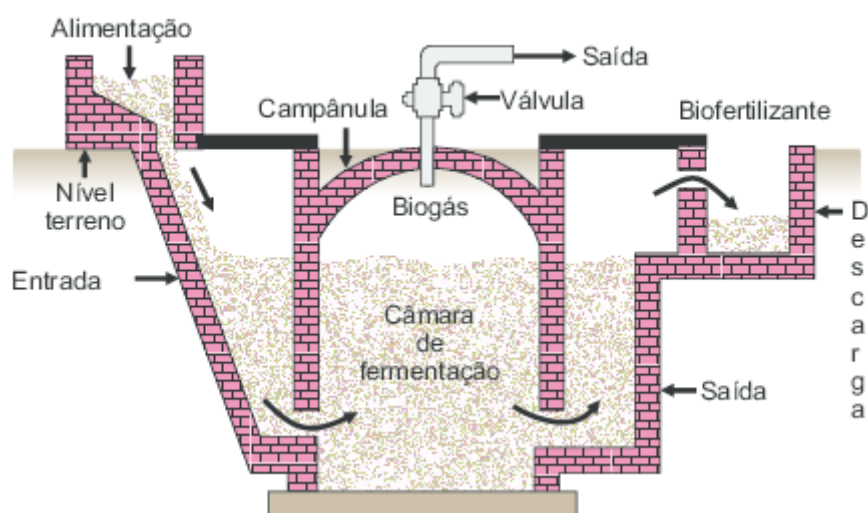
As Figuras 1 e 2 mostram um desenho esquemático dos modelos chinês e indiano de biodigestores, respectivamente.

Figura 1 – Representação esquemática de um biodigestor modelo indiano



Fonte: (PERLINGEIRO, 2014)

Figura 2 – Representação esquemática de um biodigestor modelo chinês

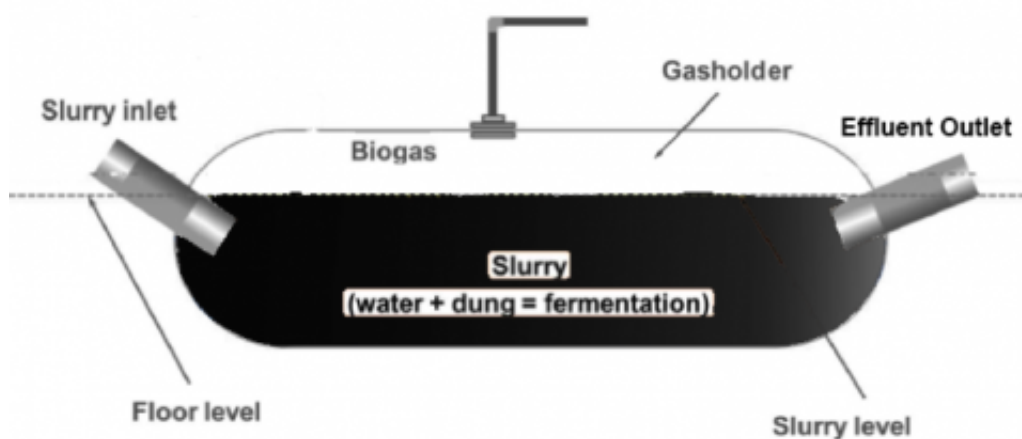


Fonte: (PERLINGEIRO, 2014)

O biodigestor de modelo canadense, também chamado de biodigestor de fluxo contínuo, é construído em uma lona de polietileno que forma uma câmara fechada de formato cilíndrico com uma abertura em cada uma das extremidades que são a entrada de dejetos e a saída da matéria orgânica digerida. A câmara formada pela lona é enterrada em uma vala construída no chão para melhor vedação e conservação do calor. Esse tipo de biodigestor foi utilizado em algumas propriedades na região Sul do Brasil e apresentou uma melhor eficiência do que os modelos indiano e chinês devido à sua grande área de contato com o exterior, o que possibilitou uma maior área de absorção de calor e consequentemente uma maior produção de biogás (RICARDO, 2013)

A Figura 3 mostra uma representação esquemática do biodigestor do tipo canadense.

Figura 3 – Representação esquemática de um biodigestor modelo canadense



Fonte: (MIT, 2017)

## 1.2 Geração de energia elétrica

A Resolução Normativa nº 482 de 17/04/2012 da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) regulamentou e definiu a microgeração distribuída como a produção de energia elétrica a partir de pequenas unidades geradoras que utilizam fontes renováveis de energia (ANEEL, 2014).

Pela resolução também foi criado o Sistema de Compensação de Energia Elétrica no qual o excedente de energia produzido pela propriedade passou a ser convertido em créditos de energia que, posteriormente, podem ser abatidos da conta de energia até o prazo de 60 dias.

Deste modo é possível utilizar a microgeração de energia para uma propriedade rural utilizando o biogás. Para que a geração seja possível é necessário a utilização de um motor que use o biogás como combustível, um gerador acoplado ao motor para a transformação da energia mecânica em energia elétrica e a ligação com a rede distribuidora.

A combustão do biogás se dá pela queima do metano presente na sua composição. Os motores Diesel podem operar com biogás utilizando ignição por centelha sendo necessárias algumas modificações como explicado por Mitzlaff (1988):

- Remoção da bomba injetora e dos bicos injetores.
- Redução da taxa de compressão para  $\epsilon = 10 \dots 12$ .
- Montagem de um sistema de injeção com distribuidor, bobina de ignição, vela de ignição e alternador.
- Instalação de um dispositivo para fornecer uma mistura de taxa constante de ar e combustível (Misturador Venturi ou válvula de controle pneumática).

Este trabalho tem como objetivo realizar uma análise de retorno econômico, em três propriedades rurais, para a implantação de um biodigestor e a geração de energia elétrica utilizando o metano gerado por resíduos sólidos animais.

## 2 Parâmetros para a análise de investimento

Neste capítulo será descrita a metodologia utilizada para determinar os parâmetros para o cálculo dos custos, das receitas e da Taxa Interna de Retorno.

### 2.1 Propriedades Rurais

Serão utilizados os dados de três propriedades rurais situadas no município de Ribeirão do Sul no estado de São Paulo. Durante uma visita no local foi realizada uma pesquisa para obter os dados necessários para a análise econômica. As perguntas feitas na pesquisa estão transcritas a seguir :

**Pergunta 1** : Quantas pessoas moram na propriedade?

**Pergunta 2** : Qual o consumo mensal de energia?

**Pergunta 3** : Quais equipamentos elétricos você possui na casa? Qual a potência de cada um?

**Pergunta 4** : Quanto tempo por dia cada equipamento é usado?

**Pergunta 5** : Quais os tipos de rebanho você cria na propriedade?

**Pergunta 6** : Quantos animais você possui em cada tipo de rebanho e qual é o peso médio?

**Pergunta 7** : Qual a quantidade de adubo usado anualmente, e qual é o custo?

### 2.2 Produção de Biogás

Para determinar a produção de biogás será utilizada a metodologia do Departamento de Agricultura dos Estados Unidos (KRIDER, 2009), em que se estabelece parâmetros e correlações entre os tipos de rebanho e as características bioquímicas dos dejetos produzidos, assim como as quantidades estimadas de produção diária. As tabelas utilizadas nesse trabalho estão no Apêndice A, e quando utilizadas serão devidamente referenciadas.

Para calcular o volume de dejetos produzidos e suas respectivas características é necessário saber o peso do rebanho, pois o volume e o peso de dejetos produzidos são calculados em função do peso de cada tipo de rebanho.

As tabelas fornecem a produção de dejetos produzidos diariamente por cada tipo de animal, definido como  $VD_i$ , onde  $i$  faz referência ao tipo de animal. O volume total



diário é definido como  $VT_{diário}$  e é a somatória de cada produção diária para todos  $n$  tipos de animais da propriedade.

$$VT_{diário} = \sum_{i=1}^n VD_i \quad (1)$$

### 2.2.1 Biodigestor

O biodigestor que será utilizado é biodigestor de fluxo contínuo, conhecido como biodigestor tipo canadense, que oferece uma produção contínua de biogás, possui fácil construção e manutenção e dentre os outros tipo é o que apresenta melhor eficiência para a produção de biogás.

Para calcular o volume do biodigestor será usado o método do Departamento de Agricultura dos Estados Unidos (KRIDER, 2009), onde o Fluxo Diário de Dejetos ( $FDD$ ) em metros cúbicos é definido em função do  $VT_{diário}$  e da concentração de sólidos produzidos na mistura de água e dejetos ( $CSP$ ):

$$FDD = \frac{VT_{diário} \cdot 100}{CSP \cdot 62,4} \quad (2)$$

Para uma completa produção dos sólidos voláteis em biogás é necessário que os dejetos permaneçam um certo tempo dentro do biodigestor, chamado de tempo de retenção. Herrero (2008) afirma que o tempo de retenção para clima tropical é de 25 dias. Portanto o volume total ( $V_{total}$ ) do biodigestor é o fluxo diário de dejetos multiplicado pelos dias de retenção.

$$V_{total} = FDD \cdot 25 \quad (3)$$

O biodigestor tubular pode ser aproximado para um cilindro com seção circular de raio  $r$  e comprimento  $L$ , o comprimento do biodigestor deve ser quatorze vezes o raio da seção circular (HERRERO, 2008). Assim as dimensões do biodigestor podem ser definidas como:

$$V_{total} = \pi \cdot r^2 \cdot L \quad (4)$$

$$L = 14 \cdot r \quad (5)$$

$$V_{total} = \pi \cdot r^2 \cdot 14 \cdot r \quad (6)$$

$$V_{total} = \pi \cdot 14 \cdot r^3 \quad (7)$$

$$r = \sqrt[3]{\frac{V_{total}}{14 \cdot \pi}} \quad (8)$$

Para a construção do biodigestor é necessário uma lona de polietileno, esse tipo de lona é vendida em bobinas e pode ser costurada ou colada para emendas. A lona é retangular e tem largura  $w$  e comprimento  $L$  que coincide com o comprimento do biodigestor. A largura  $w$  é a circunferência de um círculo de raio  $r$  determinado pela Equação (8). Assim pode-se definir as dimensões da lona de polietileno que será necessária para a construção do biodigestor.

$$w = 2 \cdot \pi \cdot r \quad (9)$$

### 2.2.2 Construção do biodigestor

Para estimar o custo de produção total do biodigestor será utilizado o método descrito pela EMBRAPA elaborado por Kunz et al. (2005) adaptado com valores atualizados para o ano de 2017 utilizando correções monetárias para o período (KUNZ et al., 2005). Os materiais utilizados estão descritos na Tabela 1.

Tabela 1 – Construção do biodigestor

<b>Materiais ou serviços</b>	<b>Unidade</b>	<b>Preço por unidade</b>
Serviços iniciais		
Escavação	$m^3$	R\$ 23,12
Reaterro	$m^3$	R\$ 11,00
Montagem do biodigestor		
Viga/Calha de concreto	$m^3$	R\$ 1.193,95
Contrapiso armado 15 MPa	$m^3$	R\$ 785,89
Concreto para pisos e calçadas	$m^3$	R\$ 242,00
Sistema de agitação para biodigestor	Unidade	R\$ 1.652,64
Lona PVC 1,0 mm Superior	$m^2$	R\$ 27,76
Lona PVC 0,8 mm Superior	$m^2$	R\$ 24,30
Compressão e purificação do gás		
Parede/cobertura	$m^2$	R\$ 81,49
Porta de madeira	Unidade	R\$ 98,91
Concreto para pisos e calçadas 10 MPa	$m^3$	R\$ 242,00
Sistema de purificação	Unidade	R\$ 972,14
Compressor	Unidade	R\$ 1.297,00
Condução de gás		
Registro 32 mm	Unidade	R\$ 11,00
Tubulação PVC 32 mm	Unidade (3 m)	R\$ 21,99
Armazenagem de dejetos	$m^3$	R\$ 26,87

Fonte – Autor

## 2.3 Geração de energia

A geração de energia elétrica será feita por um conjunto motor-gerador. O conjunto será escolhido de acordo com o consumo de energia da propriedade, que determinará a potência requerida do motor e os parâmetros requeridos para o gerador.

### 2.3.1 Seleção do motor e gerador

Do perfil de consumo energético e dos equipamentos utilizados na propriedade será determinado a potência consumida pela propriedade chamada de  $P_{total}$ , que será calculada pela somatória das potências dos equipamentos utilizados ao mesmo tempo. Por questões de projeto será acrescentado 20% dessa potência para o dimensionamento do gerador. Portanto a potência total pode ser calculada pela Equação ??E:P<sub>total</sub>), onde  $P_i$  é a potência do equipamento  $i$ , e  $n$  o número de equipamentos utilizados.

$$P_{total} = 1,2 \cdot \sum_i^n P_i \quad (10)$$

Utilizando potência total ( $P_{total}$ ) será selecionado um gerador que terá uma potência e uma eficiência dadas pelo fabricante e definidas respectivamente como  $P_{gerador}$  e  $\eta_{gerador}$ .

Para selecionar o motor será necessário calcular a potência que o gerador deve receber para gerar a potência fornecida pelo fabricante considerando sua eficiência, que será chamada de potência de projeto do motor ( $P_{p,motor}$ ). Para calcular a potência de projeto do motor será usada a Equação ??E:P<sub>motor</sub>).

$$P_{p,motor} = \frac{P_{gerador}}{\eta_{gerador}} \quad (11)$$

Com a potência de projeto do motor definida será selecionado um motor que possuirá uma potência chamada de  $P_{motor}$  e será definida uma eficiência  $\eta_{motor}$ .

### 2.3.2 Produção de energia

Para calcular a quantidade de energia que o metano pode fornecer deve-se determinar a entalpia de combustão do metano nas condições de trabalho ( $H_{u,t}$ ) em função da sua densidade nas condições de trabalho ( $\rho_{CH_4,t}$ ) e entalpia de combustão nas condições normais de temperatura e pressão ( $H_{u,entp}$ ) que esta expressa na Equação (12) (MITZLAFF, 1988).

$$H_{u,t} = V_{CH_4} * \rho_{CH_4,t} * H_{u,entp} \quad (12)$$

Para determinar a densidade do metano nas condições de trabalho ( $\rho_{CH_4,t}$ ) será utilizada a equação de estado dos gases ideais (13), e será feita uma relação entre o estado

do metano nas condições de trabalho e outro estado nas condições normais de temperatura e pressão.

$$p \cdot V = m \cdot \rho \cdot T \quad (13)$$

Substituindo os parâmetros da CNTP na Equação 13 tem-se a Equação (14).

$$p_{CH_4,CNTP} \cdot V = m \cdot \rho_{CH_4,CNTP} \cdot T_{CH_4,CNTP} \quad (14)$$

Nas condições de trabalho tem-se a Equação 15.

$$p_{CH_4,t} \cdot V = m \cdot \rho_{CH_4,t} \cdot T_{CH_4,t} \quad (15)$$

No biodigestor a massa e o volume são constantes nos dois estados, portanto pode-se igualar as Equações (14) e (15) utilizando a massa e o volume como parâmetros em comum entre as duas equações.

$$\frac{\rho_{CH_4,CNTP} \cdot T_{CH_4,CNTP}}{p_{CH_4,CNTP}} = \frac{\rho_{CH_4,t} \cdot T_{CH_4,t}}{p_{CH_4,t}} \quad (16)$$

Reorganizando a Equação (16) tem-se:

$$\rho_{CH_4,t} = \rho_{CH_4,CNTP} \cdot \frac{p_{CH_4,t} \cdot T_{CH_4,CNTP}}{p_{CH_4,CNTP} \cdot T_{CH_4,t}} \quad (17)$$

Os parâmetros na CNTP são encontrados na literatura, a temperatura de trabalho será utilizada a média das temperaturas máximas local. A pressão ambiente de trabalho é dada pela Equação 18, onde  $p_{planta}$  é a pressão no biodigestor,  $p_{vapor}$  é a pressão de vapor d'água na mistura e  $p_{amb}$  é a pressão atmosférica local.

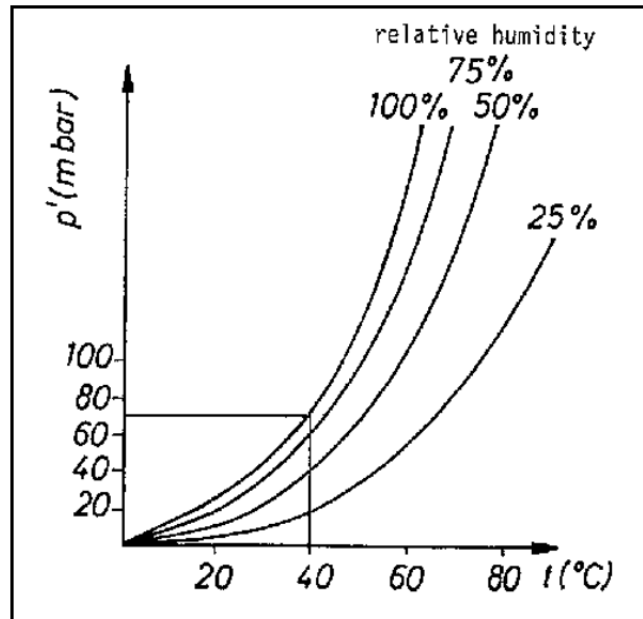
$$p_t = p_{amb} + p_{planta} - p_{vapor} \quad (18)$$

A pressão parcial do vapor d'água no biogás é retirado da Figura 4, que será considerado sempre cem por cento de umidade relativa.

Deste modo, tendo todos os parâmetros conhecidos e utilizando as Equações (17) e (12) e sabendo a quantidade de volume produzido diariamente ( $VT_{diário}$ ) é possível determinar a quantidade de energia que o metano pode fornecer por dia ( $E_{CH_4,dia}$ ), expresso pela Equação (19).

$$E_{CH_4,dia} = H_{u,t} \cdot VT_{diário} \quad (19)$$

Figura 4 – Pressão parcial do vapor d'água no biogás



Fonte: (MITZLAFF, 1988)

Para determinar o consumo de metano deve-se determinar a potência que deverá ser fornecida durante sua combustão que é calculada em função da potência do motor e sua respectiva eficiência. Definindo a potência de combustão do metano como  $P_{c,metano}$  ela é calculada pela Equação (20).

$$P_{c,metano} = \frac{P_{motor}}{\eta_{motor}} \quad (20)$$

Sabendo a quantidade de energia que o metano pode fornecer diariamente e a potência que o metano deve fornecer para o motor ( $P_{c,metano}$ ) pode-se determinar o tempo que a produção diária de metano pode manter o motor em operação, que é expressa pela Equação 21 onde o tempo  $t$  é em horas.

$$t_{horas} = \frac{E_{CH_4,dia}}{P_{c,metano}} \cdot \frac{1}{3600} \quad (21)$$

A potência fornecida pelo gerador para a rede pode ser expressa pela potência fornecida pelo motor ( $P_{motor}$ ) multiplicado pela eficiência do gerador ( $\eta_{gerador}$ ), que multiplicado pelo número de horas de funcionamento diário ( $t_{horas}$ ) nos fornece a quantidade de energia em kWh que o metano pode fornecer para a propriedade por dia.

$$E_{kWh,dia} = P_{motor} \cdot \eta_{gerador} \cdot t_{horas} \quad (22)$$

A quantidade de energia que o metano pode fornecer por mês e por ano está expressa nas Equações 23 e 24 respectivamente.

$$E_{kWh,mês} = E_{kWh,dia} \cdot 30 \quad (23)$$

$$E_{kWh,ano} = E_{kWh,dia} \cdot 365 \quad (24)$$

## 2.4 Receitas

As receitas obtidas pela implantação da planta de biogás será o desconto dado na conta de elétrica na propriedade e o adubo que se economizará utilizando o biofertilizante.

### 2.4.1 Energia Elétrica

Para calcular a receita oriunda da geração de energia elétrica deve-se saber a porcentagem da energia anual consumida pela propriedade ( $E_{consumida,ano}$ ) que o conjunto motor-gerador pode fornecer para a mesma. A energia que se pode produzir anualmente utilizando o metano é dada pela Equação (24).

Portanto, a porcentagem do consumo que pode ser suprido pela geração de energia no período de um ano ( $PC_{anual}$ ) pode ser calculado pela Equação (25).

$$PC_{anual} = \frac{E_{kWh,ano}}{E_{consumida,ano}} \quad (25)$$

Desta maneira o desconto dado na conta de energia elétrica, que pode ser calculado pela Equação 26 onde ( $C_{kwh}$ ) é o preço do kWh médio pago anualmente pela propriedade.

$$Desconto_{kw} = C_{kwh} \cdot E_{consumida,ano} \cdot PC_{anual} \quad (26)$$

Segundo a Resolução Normativa n° 482 da (ANEEL) para os consumidores conectados em baixa tensão deverá ser pago o custo de disponibilidade que para as três propriedades em análise é o valor equivalente ao consumo de 100 kWh em um mês (ANEEL, 2014).

Assim o custo anual da disponibilidade é dado pela Equação (27).

$$C_{dis,ano} = 12 \cdot C_{kwh} \cdot 100 \quad (27)$$

Assim a receita anual é calculada pela Equação (28).

$$R_{kwh,ano} = Desconto_{kw} - C_{dis,ano} \quad (28)$$

## 2.5 Despesas

O investimento inicial ( $CI_{inicial}$ ) será a soma dos custos para aquisição do motor, do gerador, o custo da instalação e acoplamento de ambos, o custo para adaptação do motor para uso com biogás e os custos para construção e montagem do biodigestor.

As despesas anuais serão os custos de manutenção.

## 2.6 Análise do retorno econômico

Para determinar a viabilidade econômica de um empreendimento ou de um investimento, deve-se expressar em termos quantitativos o retorno em valores econômicos em relação a um determinado período de tempo, e a partir desse retorno decidir se tal investimento é vantajoso ou não (KUHNEN; BAUER, 2001).

Um dos métodos para tal análise é determinar a Taxa Interna de Retorno (TIR), que é a taxa na qual o investimento se recupera pelo período de um ano, portanto sendo possível determinar em quanto tempo o investimento se paga e começa a gerar retorno econômico.

Segundo Kuhnén e Bauer (2001) a TIR pode ser determinada pela Equação (29).

$$PV_1 = PMT_1 \cdot \frac{1 - (1 + i)^{-n}}{i} - PMT_2 \cdot \frac{1 - (1 + i)^{-n}}{i} + \frac{FV}{(1 + i)^n} - PV \quad (29)$$

Onde os parâmetros são :

**PMT<sub>1</sub>** : Valor da receita anual.

**PMT<sub>2</sub>** : Valor do custo anual.

**PV** : Valor do investimento inicial.

**PV<sub>1</sub>** : Valor presente líquido.

**FV** : Valor residual do bem.

**n** : Vida útil do investimento.

**i** : Taxa interna de retorno (elemento procurado).

### 2.6.1 Taxa Interna de Retorno

Para o cálculo da TIR será utilizada a Equação (29), para cada parâmetro da equação será definida uma correlação com os parâmetros utilizados no presente trabalho.

O valor da receita anual ( $PMT_1$ ) será o valor em dinheiro economizado na conta de energia da propriedade rural calculado pela Equação (28) somado com a valor economizado pela substituição do adubo pelo biofertilizante.

O valor do custo anual ( $PMT_2$ ) são os custos de manutenção durante o período de um ano de utilização do conjunto motor-gerador. O valor do investimento inicial (PV) é o custo de aquisição do motor-gerador, da construção do biodigestor, assim como os custos de instalação e mão de obra.

O valor residual do bem (FV) é o valor que o bem valerá depois que terminar sua vida útil. Para o presente trabalho será apenas o valor residual do conjunto motor-gerador, que é o componente que terá valor econômico ao fim de sua vida útil, e o seu valor residual será de 10% do seu valor inicial. A vida útil do investimento (n) será o tempo em anos pelo qual o projeto funcionará.

Kuhnen e Bauer (2001) determinam a TIR na Equação (29) utilizando um método iterativo, onde se arbitra um valor inicial para  $i$  e o itera até que se encontre um valor presente líquido ( $PV_1$ ) igual a zero.

Sendo a Taxa Interna de Retorno determinada serão construídos gráficos onde mostrarão a evolução do investimento e seu retorno em função do tempo.



### 3 Cálculo da Taxa Interna de Retorno

Foram realizadas três entrevistas em três propriedades diferentes para obter os dados necessários para o dimensionamento do biodigestor e da seleção do motor e gerador. Cada propriedade explorava uma atividade diferente sendo a primeira de confinamento para gado leiteiro, a segunda um semi-confinamento de gado de corte e a terceira uma criação de suínos em confinamento com gado para engorda.

Para cada propriedade será feita a análise do investimento separadamente.

#### 3.1 Propriedade 1

A atividade exercida nessa propriedade era a criação de bovinos para produção de leite em regime de confinamento, onde o gado era ordenhado no curral e seus dejetos eram retirados duas vezes ao dia. O proprietário mora no local, portanto, o consumo de energia da casa é em conjunto com o consumo de energia do confinamento.

Os dados fornecidos pelo proprietário estão apresentado na Tabela 2.

Tabela 2 – Dados fornecidos sobre a propriedade 1

Características		
Número de pessoas		5
Consumo de energia mensal		1277 kWh
Animais		
Tipo de animal	Peso médio	Quantidade
Vacas de leite	450 kg	30
Bezerros	60 kg	20
Equipamentos		
Tipo	Potência	Consumo
3 ares-condicionados	0,815 kWh	6 horas cada
1 Tanque resfriador de leite	-	não desliga
1 Aquecedor de água	3 kW	14 minutos
Ordenhadeira	2,28 kW	5 horas
Bomba de água	0,37 kW	2 horas
Chuveiro	4,6 kW	1 hora

Fonte – Autor

### 3.1.1 Produção de Biogás e Biodigestor

Utilizando os fatores das Tabelas 23 e 26, do Apêndice A e os dados fornecidos pelo proprietário na Tabela 2, e com as Equações (1), (3), (8), (5) e (9) calcula-se os valores de produção total diária de biogás  $VT_{diário}$ , volume total do biodigestor,  $V_{total}$  e as dimensões da lona para o biodigestor. Os dados calculados estão na Tabela 3.

Tabela 3 – Produção de biogás e dimensões do biodigestor para a propriedade 1

	Vacas de leite	Bezerros	Total
Quantidade	30	20	-
Peso médio	450 kg	60 kg	-
Peso Total	13500 kg	1200 kg	-
Volume total de dejetos ( $m^3/dia$ )	0,84	0,08	0,92
Concentração de sólidos (CSP)	50%	50%	50%
Fluxo Diário de Dejetos $m^3/dia$			2,95
Sólidos totais (kg/dia)	162	11,04	173,04
Sólidos Voláteis (kg/dia)	124,2	9,24	133,44
Produção máxima de Metano ( $m^3/dia$ )	29,8	1,57	31,4
Nitrogênio (kg/dia)	8,91	0,5	9,4
Fósforo (kg/dia)	1,5	0,06	1,56
Potássio (kg/dia)	4,05	0,13	4,18
Biodigestor			
Volume Total ( $V_{total}$ ) ( $m^3$ )			75
Raio $r$ (m)			1,2
Comprimento L da lona (m)			16,8
Largura w da lona (m)			7,5

Fonte – Autor

## 3.2 Propriedade 2

Nessa propriedade há uma criação de gado para corte, onde existe uma rotatividade entre pasto e confinamento. A análise realizada é feita somente com o gado que está em confinamento pois não é possível coletar os dejetos do gado que está no pasto. Os dados fornecidos estão na Tabela 4.

Tabela 4 – Dados fornecidos sobre a propriedade 2

Características		
Número de pessoas		3
Consumo de energia mensal		900 kWh
Animais		
Tipo de animal	Peso médio	Quantidade
Vacas	450 kg	58
Touros	450 kg	27
Equipamentos		
Tipo	Potência	Consumo
1 moedor de ração	2,24 kWh	1 hora/dia
1 Moedor de Milho	7,5 kWh	5 horas/semana
1 Bomba de água	3 kWh	1 hora /dia
Lavadora alta pressão	2,9 kWh	20 horas/mês
Chuveiro	4,6 kW	35 minutos/dia

Fonte – Autor

### 3.2.1 Produção de Biogás e Biodigestor

Utilizando os fatores das Tabelas 24 e 26, do Apêndice A e os dados fornecidos pelo proprietário na Tabela 4, e com as Equações (1), (3), (8), (5) e (9) calcula-se os valores de produção total diária de biogás  $VT_{diário}$ , volume total do biodigestor,  $V_{total}$  e as dimensões da lona para o biodigestor. Os dados calculados estão na Tabela 5.

Tabela 5 – Produção de biogás e dimensões do biodigestor para a propriedade 2

	Vacas	Touros	Total
Quantidade	58	27	-
Peso médio	450 kg	450 kg	-
Peso Total	26100 kg	12250 kg	-
Volume total de dejetos ( $m^3/dia$ )	2,78	1,3	4,08
Concentração de sólidos (CSP)	50%	50%	50%
Fluxo Diário de Dejetos $m^3/dia$			13
Sólidos totais (kg/dia)	339	159,25	498
Sólidos Voláteis (kg/dia)	287,1	134,75	421,85
Produção máxima de Metano ( $m^3/dia$ )	94,74	44,46	139,16
Nitrogênio (kg/dia)	9,135	4,28	13,42
Fósforo (kg/dia)	2,08	0,98	3,06
Potássio (kg/dia)	6,53	3,06	9,59
Biodigestor			
Volume Total (sólido+gás) $m^3$			325
Raio $r$ (m)			1,94
Comprimento L da lona (m)			28
Largura w da lona (m)			12,30

Fonte – Autor

### 3.3 Propriedade 3 :Criação de suínos

Nessa propriedade há uma criação de suínos para engorda e abate. Os suínos são criados em chiqueiros onde toda sua produção de dejetos é lavada diariamente e armazenada em uma fossa. Também há uma criação de gado para engorda, porém ela não será considerada pois não é viável recolher o dejetos no pasto. Os dados fornecidos estão na Tabela 6.

Tabela 6 – Dados fornecidos sobre a propriedade 3

Características		
Número de pessoas		9
Consumo de energia mensal		850 kWh
Animais		
Tipo de animal	Peso médio	Quantidade
Vacas	450 kg	15
Bezerros	60 kg	12
Porcas matrizes	250	17
Leitões para engorda	90	170
Equipamentos		
Tipo	Potência	Consumo
1 moedor de ração	5,5 kWh	5 horas/semana
1 ordenhadeira	1,47 kWh	40 minutos/dia
Chuveiro	4,6 kWh	108 minutos /dia

Fonte – Autor

### 3.3.1 Produção de Biogás e Biodigestor

Utilizando os fatores das Tabelas 25, 24 e 26, do Apêndice A e os dados fornecidos pelo proprietário na Tabela 6, e com as Equações (1), (3), (8), (5) e (9) calcula-se os valores de produção total diária de biogás  $VT_{diário}$ , volume total do biodigestor,  $V_{total}$  e as dimensões da lona para o biodigestor. Os dados calculados estão na Tabela 7.

Tabela 7 – Produção de biogás e dimensões do biodigestor para a propriedade 3

	Matrizes	Leitões	Total
Quantidade	17	170	-
Peso médio	250	90	-
Peso Total	4250	15300	-
Volume total de dejetos ( $m^3/dia$ )	0,26	1,05	1,31
Concentração de sólidos (CSP)	50%	50%	50%
Fluxo Diário de Dejetos $m^3/dia$			4,20
Sólidos totais (kg/dia)	25	99,45	124,45
Sólidos Voláteis (kg/dia)	22,95	82,62	105,57
Produção máxima de Metano ( $m^3/dia$ )	8,26	38,8	47,06
Nitrogênio (kg/dia)	1,91	8,26	10,17
Fósforo (kg/dia)	0,55	1,37	1,92
Potássio (kg/dia)	1,19	3,67	4,86
Biodigestor			
Volume Total (sólido+gás) $m^3$			104
Raio $r$ (m)			1,33
Comprimento L da lona (m)			18,7
Largura w da lona (m)			8,40

Fonte – Autor

### 3.4 Seleção do conjunto motor-gerador

Com o perfil de consumo energético de cada propriedade é possível selecionar o conjunto motor-gerador. Para o primeiro dimensionamento a eficiência do gerador e do motor serão respectivamente,  $\eta_{gerador} = 0,9$  e  $\eta_{motor} = 0,3$ . Depois de selecionados, serão usadas as eficiências determinadas pelo fabricante, caso haja.

As potências serão calculadas de acordo com a Subseção 2.3.1, os resultados para cada propriedade estão na Tabela 8.

Tabela 8 – Parâmetros para seleção do gerador

	Propriedade 1	Propriedade 2	Propriedade 3
Potência Total $P_{total}$ (kW)	13,27	24,28	13,88
Potência de projeto gerador (kW)	14	24	14

Fonte – Autor

Para as propriedades 1 e 3 foi selecionado um gerador trifásico de 17,5 kVA, modelo TA17.5CT2 da marca Toyama. Para a propriedade 2 foi selecionado um gerador trifásico de 30 kVA da marca Bambozzi.

Para selecionar os motores será calculada a potência de projeto do motor ( $P_{p,motor}$ ) utilizando a Equação (11), os valores calculados estão dispostos na Tabela 9.

Tabela 9 – Parâmetros para seleção do motor

	Propriedade 1	Propriedade 2	Propriedade 3
Potência do gerador selecionado (kW)	14	24	14
Potência de projeto do motor (kW)	15,55	26,66	15,55

Fonte – Autor

O motor selecionado para as propriedades 1 e 3 foi o modelo TDW22DRE com potência nominal de 20 cavalos da marca Toyama. Para a propriedade 2 o motor selecionado foi o modelo TDWE30E-HD da marca Toyama com potência nominal de 27,5 cavalos.

### 3.5 Consumo de biogás e produção de energia

Determinada a potência necessária para fornecer energia é possível determinar o consumo volumétrico de biogás para cada propriedade utilizando o método de Mitzlaff (1988) descrito na Subseção 2.3.2.

A temperatura ambiente será a temperatura máxima média anual, pois o motor será operado durante o dia. Os dados de temperatura e pressão ambiente e os parâmetros termodinâmicos do metano e correção da densidade segundo a Equação (17) estão descritos na Tabela 10.

Tabela 10 – Parâmetros termodinâmicos do metano e condições ambientes

Parâmetros metano na condições normais de temperatura e pressão (CNTP)	
Densidade $\rho_{cntp}$	0,72 kg/m <sup>3</sup>
Constante individual do gás (R)	0,518 kJ/kg · K
Entalpia de combustão $H_u$	36000 kJ/m <sup>3</sup> · n
Condições Ambientes	
Média de temperatura máxima $T_t$	28,7 ° C
Pressão atmosférica local $p_{amb}$	101,2 kPa
Pressão do vapor de água $p_{vapor}$	4,5 kPa
Pressão corrigida ( $p_t$ )	96,7 kPa
Densidade corrigida $\rho_t$	0,597 kg/m <sup>3</sup>
Entalpia de Combustão nas condições de trabalho $H_{u,t}$	29850 kJ/m <sup>3</sup> · n

Com as propriedades termodinâmicas do metano, e com a produção de metano diária é possível determinar quanto de energia o metano pode fornecer para a propriedade.

Os dados de produção de metano das Tabelas 3, 5 e 7 expressam a capacidade máxima de produção de metano a partir dos dejetos, porém deve-se considerar que o biodigestor anaeróbico produz efetivamente 90% dessa quantidade máxima (USEPA, 1995). Os valores da produção efetiva de metano e a capacidade de geração de energia de cada propriedade estão na Tabela 11.

Tabela 11 – Capacidade de geração de energia para cada propriedade

	Propriedade 1	Propriedade 2	Propriedade 3
Capacidade máxima de produção de metano ( $m^3/dia$ )	31,4	139,16	47,06
Capacidade efetiva de produção de metano ( $m^3/dia$ )	28,26	125,24	42,35
Capacidade de geração de energia ( $MJ$ )	843,561	3738,414	1264,15
Potência de combustão requerida ( $kW$ )	49,03	67,4	49,03
Tempo que o biogás pode suprir potência requerida (horas)	5,09	15,40	7,16
Potência gerada ( $kWh$ )	14	24	14
Capacidade de geração mensal ( $kWh/mês$ )	2137	11088	3007

Fonte – Autor

## 3.6 Análise do retorno do investimento

### 3.6.1 Custos

Os custos para a implantação do projeto foi baseada em pesquisas de mercado do preço dos materiais e equipamentos, assim como o preço da mão de obra para a construção e instalação da planta de biogás.

Utilizando os dados da Tabela 1 e das Tabelas 3, 5 e 7 calcula-se o custo para a construção do biodigestor para as propriedades 1, 2 e 3 que estão descritos nas Tabelas 12, 13 e 14 respectivamente.



Tabela 12 – Construção do biodigestor para a propriedade 1

<b>Materiais ou serviços</b>	<b>Quantidade</b>	<b>Preço total</b>
Serviços iniciais		
Escavação	17,5 $m^3$	R\$404,60
Reaterro	17,5 $m^3$	R\$ 192,50
Montagem do biodigestor		
Viga/Calha de concreto	1,75 $m^3$	R\$ 2089,41
Contrapiso armado 15 MPa	1,75 $m^3$	R\$ 610,15
Concreto para pisos e calçadas	1,71 $m^3$	R\$ 586,51
Sistema de agitação para biodigestor	Unidade	R\$ 1652,64
Lona PVC 1,0 mm Superior	63 $m^2$	R\$ 1748,88
Lona PVC 0,8 mm Superior	63 $m^2$	R\$ 1530,90
Compressão e purificação do gás		
Parede/cobertura	16,80 $m^2$	R\$ 1369,00
Porta de madeira	Unidade	R\$ 98,91
Concreto para pisos e calçadas 10 MPa	3,75 $m^3$	R\$ 1286,21
Sistema de purificação	Unidade	R\$ 972,14
Compressor	Unidade	R\$ 1297,00
Condução de gás		
Registro 32 mm	5	R\$ 55,00
Tubulação PVC 32 mm	Unidade (3 m)	R\$ 1319,40
Armazenagem de dejetos	150 $m^3$	R\$ 4030,50
Preço total		R\$ 19243,75

Fonte – Autor

Tabela 13 – Construção do biodigestor para a propriedade 2

<b>Materiais ou serviços</b>	<b>Quantidade</b>	<b>Preço total</b>
Serviços iniciais		
Escavação	38 $m^3$	R\$ 878,56
Reaterro	38 $m^3$	R\$ 418
Montagem do biodigestor		
Viga/Calha de concreto	7,60 $m^3$	R\$ 9051,34
Contrapiso armado 15 MPa	1,75 $m^3$	R\$ 2642,58
Concreto para pisos e calçadas	1,71 $m^3$	R\$ 2541,47
Sistema de agitação para biodigestor	Unidade	R\$ 1652,64
Lona PVC 1,0 mm Superior	173 $m^2$	R\$ 4802,48
Lona PVC 0,8 mm Superior	173 $m^2$	R\$ 4203,90
Compressão e purificação do gás		
Parede/cobertura	16,80 $m^2$	R\$ 1369,00
Porta de madeira	Unidade	R\$ 98,91
Concreto para pisos e calçadas 10 MPa	3,75 $m^3$	R\$ 1286,21
Sistema de purificação	Unidade	R\$ 972,14
Compressor	Unidade	R\$ 1297,00
Condução de gás		
Registro 32 mm	5	R\$ 55,00
Tubulação PVC 32 mm	Unidade (3 m)	R\$ 2199,00
Armazenagem de dejetos	600 $m^3$	R\$ 16122,00
Preço total		R\$ 49590,23

Fonte – Autor

Tabela 14 – Construção do biodigestor para a propriedade 3

<b>Materiais ou serviços</b>	<b>Quantidade</b>	<b>Preço total</b>
Serviços iniciais		
Escavação	25 $m^3$	R\$ 578,00
Reaterro	25 $m^3$	R\$ 275,00
Montagem do biodigestor		
Viga/Calha de concreto	2,50 $m^3$	R\$ 2984,87
Contrapiso armado 15 MPa	2,50 $m^3$	R\$ 871,45
Concreto para pisos e calçadas	2,40 $m^3$	R\$ 779,98
Sistema de agitação para biodigestor	Unidade	R\$ 1652,64
Lona PVC 1,0 mm Superior	80 $m^2$	R\$ 2220,80
Lona PVC 0,8 mm Superior	80 $m^2$	R\$ 1944,00
Compressão e purificação do gás		
Parede/cobertura	16,80 $m^2$	R\$ 1369,00
Porta de madeira	Unidade	R\$ 98,91
Concreto para pisos e calçadas 10 MPa	3,75 $m^3$	R\$ 1286,21
Sistema de purificação	Unidade	R\$ 972,14
Compressor	Unidade	R\$ 1297,00
Condução de gás		
Registro 32 mm	5	R\$ 55,00
Tubulação PVC 32 mm	Unidade (3 m)	R\$ 747,66
Armazenagem de dejetos	200 $m^3$	R\$ 5374,00
Preço total		R\$ 22506,66

Fonte – Autor

Os custos para aquisição do conjunto motor gerador, para a construção de uma casa de máquinas e para a modificação no motor estão descritos na Tabela 15.

Tabela 15 – Custo para geração de energia

<b>Equipamento</b>	<b>Preço</b>
Propriedade 1 e 3	
Alternador TA17.5CT2 Toyama, 17,5 kVA	R\$ 2982,18
Motor a Diesel Toyama TDW22DRE 22HP	R\$ 4349,90
Total	R\$ 13014,00
Propriedade 2	
Alternador 30 kVA Bambozzi	R\$ 8403,25
Motor Toyama Tdwe30e-hd	R\$ 5990,00
Total	R\$ 20567,24
Adicional Casa de máquinas	R\$ 800,00
Custo para modificações no motor	R\$ 2984,89

Fonte – Autor

Foi consultado um eletricista para fazer um orçamento para realizar a ligação à rede distribuidora, os equipamentos necessários, os preços e a mão de obra estão descritos na Tabela 16.

Tabela 16 – Custos para ligar à rede de distribuição

<b>Equipamento</b>	<b>Quantidade</b>	<b>Preço Total</b>
Contator	2	R\$ 229,74
Relê falta de fase	1	R\$ 132,00
Relê térmico	1	R\$ 73,90
Relê de tempo	1	R\$ 219,00
Relógio de medição	1	R\$ 129,90
Disjuntor tripolar	1	R\$ 56,10
Fios	300 m	R\$ 1662,00
Postes	4	R\$ 760,00
Mão de Obra		R\$ 2000,00
Total		R\$ 5261,74

Fonte – Autor

O custo de manutenção anual será considerado 2% do valor total do investimento inicial.

### 3.6.2 Receitas

As receitas serão a economia gerada na conta de energia e a utilização do biofertilizante como insumo agropecuário.

A produção anual de biofertilizantes, assim como seu custo, está descrita na Tabela 17. A propriedade 3 já utiliza o esterco como adubo, portanto não será contabilizado como receita.

Tabela 17 – Produção anual de biofertilizantes

	Propriedade 1	Propriedade 2
Produção de Nitrogênio (kg)	3431	4898
Produção de Fósforo (kg)	569,4	1117
Produção de Potássio (kg)	1525,7	3500
Total com subtrato (kg)	11052	9515
Receita equivalente anual	R\$ 3000,00	R\$ 6750,00

Fonte – Autor

A receita advinda da geração de energia está descrita na Tabela 18.

Tabela 18 – Receita pela geração de energia

	Propriedade 1	Propriedade 2	Propriedade 3
Consumo médio mensal (kWh)	1277	900	850
Desconto da geração de energia	100%	100%	100%
Receita equivalente	R\$ 5120,16	R\$ 3672,00	R\$ 3468
Pagamento mínimo	R\$ 31,12	R\$ 31,12	R\$ 31,12
Receita anual	R\$ 4746,72	R\$ 3298,65	R\$ 3094,56

Fonte – Autor

### 3.6.3 Taxa Interna de Retorno

Os valores de receita estão na Tabela 19

Os custos calculados para cada propriedade estão na Tabela 20.

Para cada propriedade será calculada a Taxa Interna de Retorno (TIR). Os parâmetros da Equação (29), e a respectiva taxa para cada propriedade está descrita na Tabela 21.

Tabela 19 – Receitas totais para cada propriedade

	Propriedade 1	Propriedade 2	Propriedade 3
Biofertilizante	R\$ 3000,00	R\$ 6750,00	-
Geração de energia	R\$4746,72	R\$ 3298,65	R\$ 3094,56
Receitas totais anuais ( $PMT_1$ )	R\$ 7746,72	R\$ 10048,65	R\$ 3094,56

Fonte – Autor

Tabela 20 – Receitas totais para cada propriedade

	Propriedade 1	Propriedade 2	Propriedade 3
Biodigestor	R\$ 19243,75	R\$ 49590,23	R\$ 22506,66
Geração de energia	R\$ 16798,89	R\$ 24352,13	R\$ 16798,89
Distribuição de energia	R\$ 5261,74	R\$ 5261,74	R\$ 5261,74
Investimento inicial total ( $PV$ )	R\$ 41304,38	R\$ 79204,10	R\$ 44567,29
Custo de manutenção anual ( $PMT_2$ )	R\$ 766,39	R\$1524,38	R\$ 831,65

Fonte – Autor

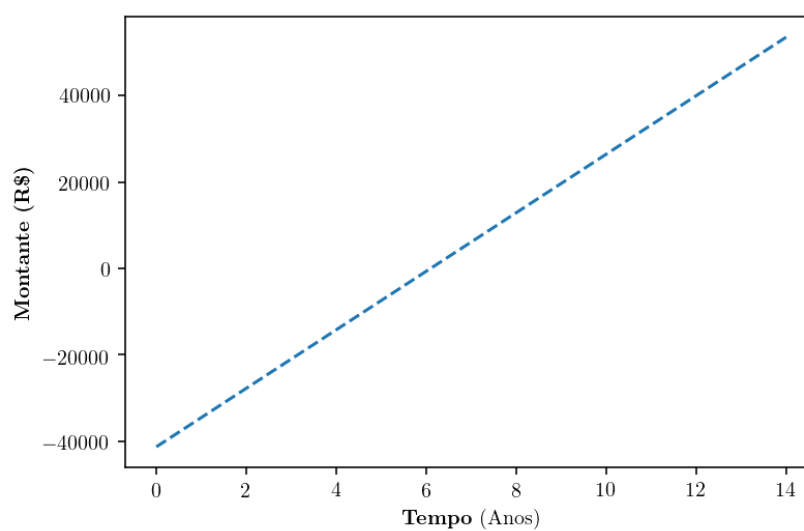
Tabela 21 – Taxa Interna de Retorno

	Propriedade 1	Propriedade 2	Propriedade 3
Receita anual $PMT_1$	R\$ 7746,72	R\$ 10048,65	R\$ 3094,56
Custo anual $PMT_2$	R\$ 766,39	R\$1524,38	R\$ 831,65
Investimento inicial $PV$	R\$ 41304,38	R\$ 79204,10	R\$ 44567,29
Valor residual do bem $FV$	R\$ 1907,57	R\$ 2662,90	R\$ 1907,57
Vida útil do investimento (anos) $n$	15	15	15
Taxa interna de retorno $i$	14,84%	6,88%	3,09%

Fonte – Autor

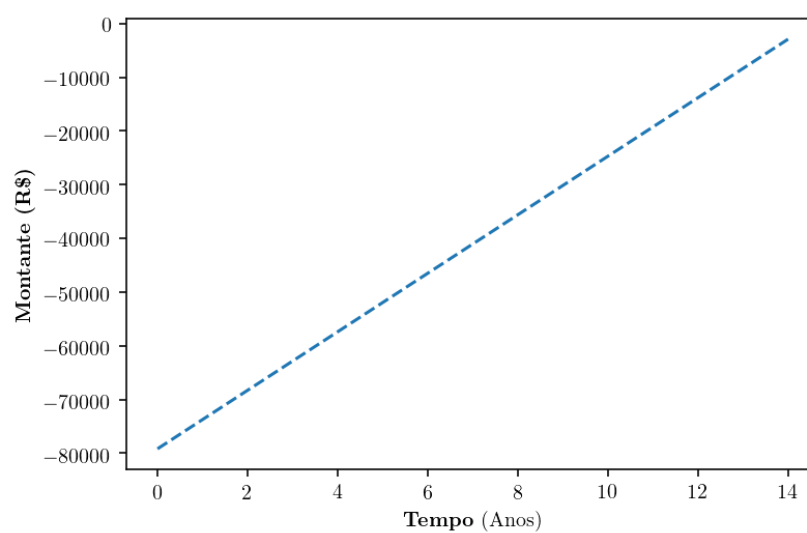
Para cada propriedade foi gerado um gráfico para ilustrar como o retorno do investimento se dá ao longo dos 15 anos de vida útil do projeto, os gráficos para as Propriedades 1, 2 e 3 estão ilustrados respectivamente nas Figuras 5, 6 e 7.

Figura 5 – Taxa Interna de Retorno para a propriedade 1



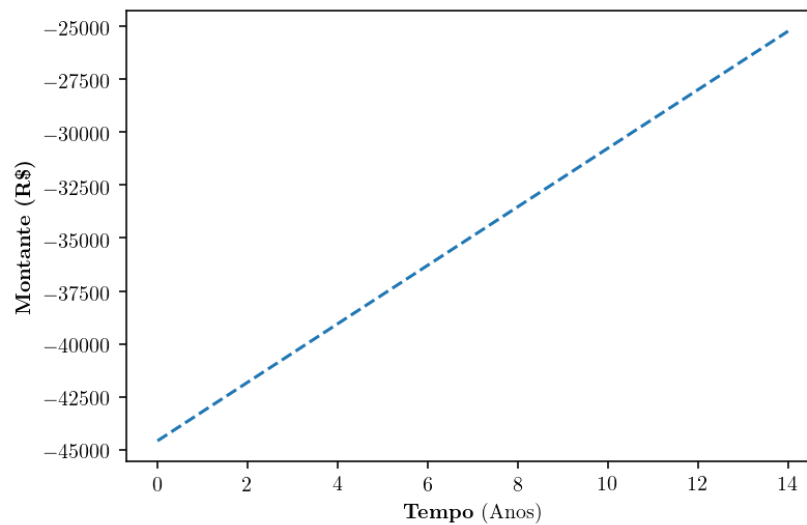
Fonte: Autor

Figura 6 – Taxa Interna de Retorno para a propriedade 2



Fonte: Autor

Figura 7 – Taxa Interna de Retorno para a propriedade 3



Fonte: Autor

### 3.7 Discussão

Analisando as Figuras 5, 6 e 7 observa-se que apenas o investimento na Propriedade 1 se paga ao longo da vida útil gerando retorno econômico após ao sexto ano, e para as Propriedades 2 e 3 o investimento não se paga ao longo da vida útil.

As propriedades 2 e 3 tem um grande potencial de geração de energia, porém o retorno econômico é vinculado ao gasto mensal de energia da propriedade, pois ainda não é possível vender energia para rede, mas apenas utilizar como créditos para o pagamentos de futuras contas, ou contas do mesmo titular.

Devido ao potencial não utilizado pode-se dizer que houve um super dimensionamento para as plantas de biogás a serem instaladas na propriedades resultando assim um investimento inicial muito grande, portanto uma das maneiras para diminuir o custo é dimensionar a planta de biogás de acordo com o consumo energético da propriedade e não com a capacidade de geração de energia. Isso se observa na propriedade 1 onde o dimensionamento foi realizado para geração de energia é 67% maior do que o consumo energético da propriedade, em contrapartida das propriedades 2 e 3 onde o dimensionamento realizado corresponde a 1200% e 375% respectivamente.

Utilizando o argumento citado nesta seção será analisado o investimento da Propriedade 1 aplicado às propriedades 2 e 3, que utilizará menos dejetos mas ainda sim supriria as necessidades energéticas das propriedades, os resultados estão na Tabela 22.



Tabela 22 – Investimento da propriedade 1 aplicado nas propriedades 2 e 3

	Propriedade 1	Propriedade 2	Propriedade 3
Receita anual $PMT_1$	R\$ 7746,72	R\$ 10048,65	R\$ 3094,56
Custo anual $PMT_2$	R\$ 766,39	R\$ 1524,38	R\$ 766,39
Investimento inicial $PV$	R\$ 41304,38	R\$ 42683,63	R\$ 41304,38
Valor residual do bem $FV$	R\$1907,57	R\$1907,57	R\$1907,57
Vida útil do investimento (anos) $n$	15	15	15
Taxa interna de retorno $i$	14,84%	18,46 %	3,91%

Fonte – Autor

Pelos resultados obtidos pode-se observar que o redimensionamento para a produção energética mais próxima do gasto mensal pode gerar uma economia para a propriedade 2 tornando o investimento rentável com uma taxa interna de retorno de 18,46% gerando lucro a partir do quinto ano.

Houve um aumento para a taxa interna de retorno para a propriedade 3 porém não foi suficiente para gerar um retorno econômico viável, um dos fatores que contribuem para a baixa taxa interna de retorno é a não utilização do biofertilizante como fator de retorno econômico, juntamente com o baixo consumo de energia.

## 4 Conclusões

O uso de biodigestores é uma alternativa para a produção de energia renovável que tem como benefícios a transformação de dejetos animais em energia, o tratamento adequado de esgoto animal e a utilização do biofertilizante para adubar plantações que como demonstrado pode gerar receitas para as propriedades rurais.

Utilizando uma metodologia do Departamento de Agricultura dos Estados Unidos foi calculada a produção de metano para propriedade em função do número de animais e do peso médio de cada tipo de rebanho criado, e com a capacidade de geração de metano calculou-se a capacidade de geração de energia de cada propriedade, que demonstrou ser suficiente para suprir uma pequena propriedade rural.

Na primeira análise, a Propriedade 1 teve a TIR de 14,84% no qual o investimento começa gerar retorno econômico a partir do sexto ano, para as Propriedades 2 e 3 a TIR foi de 6,88% e 3,09% respectivamente, sendo que o investimento não se paga ao longo dos 15 anos de vida útil.

O dimensionamento das plantas de biogás foi baseado na capacidade de produção de dejetos das propriedades, que no caso da propriedade 2 e 3 eram volumes de 325  $m^3$  e 104  $m^3$  respectivamente, o que demanda um biodigestor grande e de custo elevado para sua implantação, e que tem uma alta capacidade de geração de energia. Porém a demanda energética das propriedades é baixa correspondendo à 8,11% da capacidade de geração da propriedade 1 e 28% para a propriedade 2, e todo o excedente não pode ser transformado em retorno econômico pois pela Resolução Normativa n° 482 da ANEEL não é permitida a venda de energia para microgeração de baixa tensão, sendo assim houve um superdimensionamento para as plantas de biogás para as propriedades 2 e 3.

Em uma segunda análise, utilizou-se a implantação do biodigestor utilizado na propriedade 1 nas propriedades 2 e 3 e obteve-se uma taxa interna de retorno de 18,46% para a propriedade 2 e 3,91% para a propriedade 3. Portanto, um dimensionamento para a produção de biogás mais próximo à demanda energética da propriedade mostrou-se um aumento na taxa interna de retorno pois os custos diminuíram para uma mesma geração de receita.

Para a propriedade 3, a taxa interna de retorno ainda não foi suficiente para gerar retorno econômico ao longo dos 15 anos de vida útil. Um dos motivos foi a não utilização de biofertilizante como adubo. Uma alteração que pode ser feita no projeto para a Propriedade 3 é a utilização de outros tipos de biodigestores, como o modelo chinês e indiano, que são mais adequados para pequenas produções de biogás e possuem menor custo.

Deste modo conclui-se que para uma análise de investimento deve-se basear o dimensionamento do biodigestor em função da demanda energética da propriedade, para que não haja um super dimensionamento baseado na capacidade de geração de energia, pois o excedente produzido não pode ser transformado em receita devido às barreiras legais encontradas na legislação brasileira.

## Referências

- ANEEL, C. T. Micro e minigeração distribuída. *Sistema de Compensação de Energia Elétrica. Brasília, DF, Brasil: Centro de Documentação–Cedoc*, 2014.
- BARRERA, P. *Biodigestores: energia, fertilidade e saneamento para a zona rural*. [S.l.]: Ícone, 1993.
- BELCHIOR, G. P. N.; MATIAS, J. L. N. Protocolo de quioto, mecanismos de flexibilização e crédito de carbono. 2009.
- HERRERO, J. M. *Biodigestores familiares: Guía de diseño y manual de instalación*. [S.l.]: Jaime Marti Herrero, 2008.
- HOGAN, D. J. et al. Crescimento populacional e desenvolvimento sustentável. *Lua Nova: revista de cultura e política*, Cedec, 1993.
- KRIDER, J. Agricultural waste management field handbook. *US Department of Agriculture: Washington, DC, USA*, 2009.
- KUHNEN, O. L.; BAUER, U. R. *Matemática financeira aplicada e análise de investimentos*. [S.l.]: Atlas, 2001.
- KUNZ, A.; HIGARASHI, M. M.; OLIVEIRA, P. A. de. Tecnologias de manejo e tratamento de dejetos de suínos estudadas no Brasil. *Cadernos de Ciência & Tecnologia*, v. 22, n. 3, p. 651–665, 2005.
- KUNZ, A. et al. Comparativo de custos de implantação de diferentes tecnologias de armazenagem/tratamento e distribuição de dejetos suínos. *Embrapa Suínos e Aves-Circular Técnica (INFOTECA-E)*, Concórdia: Embrapa Suínos e Aves, 2005., 2005.
- MIT. *Bag biogas digester*. 2017. Disponível em: <<https://impactlabs.mit.edu/bag-biogas-digester>>. Acesso em: 18 de novembro 2017.
- MITZLAFF, K. von. *Engines for Biogas: Theory - Modification - Economic Operation*. Vieweg+Teubner Verlag, 1988. ISBN 9783528020323. Disponível em: <<https://books.google.com.br/books?id=LjkeYAAACAAJ>>.
- MOMBACH, M. et al. Emissão de metano entérico por bovinos: o que sabemos e que podemos fazer? In: IN: SIMPÓSIO DE PECUÁRIA INTEGRADA, 2., 2016, SINOP. RECUPERAÇÃO DE PASTAGENS: ANAIS. CUIABÁ: FUNDAÇÃO UNISELVA, 2016. P. 181-202. *Embrapa Agrossilvipastoril-Artigo em anais de congresso (ALICE)*. [S.l.], 2016.
- PERLINGEIRO, C. A. G. *Biocombustíveis no Brasil: fundamentos, aplicações e perspectivas*. [S.l.]: Synergia, 2014.
- RICARDO, C. M. Avaliação econômica de biodigestor de fluxo tubular, com sistema de recirculação, no tratamento de dejetos de suínos. UNIVERSIDADE FEDERAL DE LAVRAS, 2013.
- USEPA. *Methodologies for Estimating Greenhouse Gas Emission*. 1995.

# APÊNDICE A – Tabelas de características e produção de dejetos

As tabelas do Agricultural Waste Management Field Handbook utilizadas nesse trabalho estão dispostas a seguir.

Tabela 23 – Dejeito de gado para produção de leite

Componentes do dejeito	Unidade	Vaca lactante	Bezerro
Volume	$m^3$ /dia/1000 kg de peso animal	0,099	0,081
Sólidos voláteis (SV)	kg/dia/1000 kg de peso animal	9,2	7,7
Nitrogênio (N)	kg/dia/1000 kg de peso animal	0,66	0,42
Fósforo (P)	kg/dia/1000 kg de peso animal	0,11	0,05
Potássio (K)	kg/dia/1000 kg de peso animal	0,30	0,11

Fonte – (KRIDER, 2009) Adaptada

Tabela 24 – Dejeito de gado de corte em confinamento

Componentes do dejeito	Unidade	Bovino adulto	Bezerro
Volume	$m^3$ /dia/1000 kg de peso animal	0,106	0,075
Sólidos voláteis (SV)	kg/dia/1000 kg de peso animal	11	7,7
Nitrogênio (N)	kg/dia/1000 kg de peso animal	0,35	0,45
Fósforo (P)	kg/dia/1000 kg de peso animal	0,08	0,08
Potássio (K)	kg/dia/1000 kg de peso animal	0,25	0,29

Fonte – (KRIDER, 2009) Adaptada

Tabela 25 – Dejeito de suínos

Componentes do dejeito	Unidade	Matriz	Leitão
Volume	$m^3$ /dia/1000 kg de peso animal	0,0256	0,0687
Sólidos voláteis (SV)	kg/dia/1000 kg de peso animal	23	5,4
Nitrogênio (N)	kg/dia/1000 kg de peso animal	0,16	0,54
Fósforo (P)	kg/dia/1000 kg de peso animal	0,05	0,09
Potássio (K)	kg/dia/1000 kg de peso animal	0,11	0,24

Fonte – (KRIDER, 2009) Adaptada

Tabela 26 – Produção máxima de metano  $B_o$  por VS

Tipo de Animal	Categoria	$B_o \left( \frac{m^3 \cdot CH_4}{Kg-VS} \right)$
Gado	de corte em confinamento	0,33
	de corte sem ser em confinamento	0,17
	leiteiro	0,24
Suínos	Matrizes	0,36
	para corte	0,47
Aves	Galinhas poedeiras	0,34
	Frango para corte	0,30
	Perus	0,30
	Patos	0,32
Ovelhas	em confinamento	0,36
	no pasto	0,19
Cabras		0,17
Equinos e Muares		0,33

Fonte – (USEPA, 1995) Adaptada