

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE GOIÁS
CAMPUS GOIÂNIA
COORDENAÇÃO DO MESTRADO EM TECNOLOGIA DE PROCESSOS SUSTENTÁVEIS



Lucas da Paixão Alcântara

**A VIABILIDADE ECONÔMICA DE MODELOS DE BIODIGESTORES PARA A
PRODUÇÃO DE BIOGÁS**

Goiânia, 2019

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE GOIÁS
CAMPUS GOIÂNIA
COORDENAÇÃO DO MESTRADO EM TECNOLOGIA DE PROCESSOS SUSTENTÁVEIS

Lucas da Paixão Alcântara

**A VIABILIDADE ECONÔMICA DE MODELOS DE BIODIGESTORES PARA A
PRODUÇÃO DE BIOGÁS**

Orientação: Prof. Dr. Joachim Werner Zang
Coorientação: Profa. Dra. Warde Antonieta da
Fonseca-Zang

Goiânia, 2019

AL16v Alcântara, Lucas da Paixão.

A viabilidade econômica de modelos de biodigestores para a produção de biogás / Lucas da Paixão Alcântara. – Goiânia: Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás, 2019. 60 f. : il.

Orientador: Prof. Dr. Joachim Werner Zang.

Coorientadora: Profa. Dra. Warde Antonieta da Fonseca-Zang.

Dissertação (Mestrado) – Mestrado em Tecnologia de Processos Sustentáveis, Coordenação do Programa de Mestrado em Tecnologia de Processos Sustentáveis, Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás.

1. Bioenergia. 2. Biogás. 3. Fontes de energia renovável. I. Zang, Joachim Werner (orientador). II. Fonseca-Zang, Warde Antonieta da (coorientadora). III. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás. IV. Título.

CDD 665.776

Ficha catalográfica elaborada pela Bibliotecária Karol Almeida da Silva Abreu CRB1/ 2.740
Biblioteca Professor Jorge Félix de Souza,
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás, Câmpus Goiânia.

**TERMO DE AUTORIZAÇÃO PARA DISPONIBILIZAÇÃO
NO REPOSITÓRIO DIGITAL DO IFG - ReDi IFG**

Com base no disposto na Lei Federal nº 9.610/98, AUTORIZO o Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás, a disponibilizar gratuitamente o documento no Repositório Digital (ReDi IFG), sem ressarcimento de direitos autorais, conforme permissão assinada abaixo, em formato digital para fins de leitura, download e impressão, a título de divulgação da produção técnico-científica no IFG.

Identificação da Produção Técnico-Científica

- | | |
|--|---|
| <input type="checkbox"/> Tese | <input type="checkbox"/> Artigo Científico |
| <input checked="" type="checkbox"/> Dissertação | <input type="checkbox"/> Capítulo de Livro |
| <input type="checkbox"/> Monografia - Especialização | <input type="checkbox"/> Livro |
| <input type="checkbox"/> TCC - Graduação | <input type="checkbox"/> Trabalho Apresentado em Evento |
| <input type="checkbox"/> Produto Técnico e Educacional - Tipo: _____ | |

Nome Completo do Autor: Lucas da Paixão Alcântara
Matrícula: 2017201140120
Título do Trabalho: A Viabilidade Econômica de Modelos de Biodigestores para a produção de Biogás

Autorização - Marque uma das opções

- Autorizo disponibilizar meu trabalho no Repositório Digital do IFG;
- Autorizo disponibilizar meu trabalho no Repositório Digital do IFG somente após a data ___/___/___;
- Não autorizo disponibilizar meu trabalho no Repositório Digital do IFG.

Ao indicar a opção **2 ou 3**, marque a justificativa:

- O documento está sujeito a registro de patente.
 O documento pode vir a ser publicado como livro, capítulo de livro ou artigo.
 Outra justificativa: _____

DECLARAÇÃO DE DISTRIBUIÇÃO NÃO-EXCLUSIVA

O/A referido/a autor/a declara que:

- o documento é seu trabalho original, detém os direitos autorais da produção técnico-científica e não infringe os direitos de qualquer outra pessoa ou entidade;
- obteve autorização de quaisquer materiais inclusos no documento do qual não detém os direitos de autor/a, para conceder ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás os direitos requeridos e que este material cujos direitos autorais são de terceiros, estão claramente identificados e reconhecidos no texto ou conteúdo do documento entregue;
- cumpriu quaisquer obrigações exigidas por contrato ou acordo, caso o documento entregue seja baseado em trabalho financiado ou apoiado por outra instituição que não o Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás.

Goiânia _____ 11/09/19
Local Data

Lucas da Paixão Alcântara
Assinatura do Autor e/ou Detentor dos Direitos Autorais

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE GOIÁS
CAMPUS GOIÂNIA
COORDENAÇÃO DO MESTRADO EM TECNOLOGIA DE PROCESSOS SUSTENTÁVEIS

Lucas da Paixão Alcântara

**A VIABILIDADE ECONÔMICA DE MODELOS DE BIODIGESTORES PARA A
PRODUÇÃO DE BIOGÁS**

Orientação: Prof. Dr. Joachim Werner Zang
Coorientação: Profa. Dra. Warde Antonieta da
Fonseca-Zang

Prof. Dr. Joachim Werner Zang, IFG, Presidente da banca Examinadora

Profa. Dra. Regina Célia Bueno da Fonseca, IFG, Membro da Banca Examinadora

Prof. Dr. Wilson Mozena Leandro, Membro da Banca Examinadora

Profa. Dra. Warde Antonieta da Fonseca-Zang, IFG, Suplente

Aprovado em: 28/08/2019

RESUMO

A adoção do biogás não é apenas financeiramente viável, mas também favorável ao meio ambiente como uma tecnologia que ajuda a reduzir as emissões de carbono. A população rural dos países em desenvolvimento precisa urgentemente de biogás para cozimento, iluminação e refrigeração, pois existe uma demanda por biogás nessas comunidades, que advém de uma deficiência energética. Através de uma revisão bibliográfica sistemática, utilizando a base de dados Periódicos CAPES, e por meio da comparação entre os diferentes modelos de digestor existentes, analisando parâmetros financeiros, socioeconômicos e as causas de insucesso da implantação dessas tecnologias, o digestor modelo Tubular se destaca pelos baixos custos e pela facilidade de construção e operação. A elaboração de um projeto com as diretrizes necessárias para construção e operação de um digestor Tubular, aliado ao incentivo de políticas públicas governamentais, são fatores que vão impulsionar a adoção e ampliação de tecnologias renováveis no Brasil. Para a produção de biogás em larga escala destaca-se o modelo CSTR, abreviado do inglês *continuous stirred tank reactor*, um reator de tanque de fluxo contínuo com agitação, devido aos resultados positivos dos parâmetros determinísticos como o Valor Presente Líquido de R\$ 1.888.166,24 e Payback de aproximadamente 3,2 anos. A análise estatística da probabilidade de sucesso da implantação deste tipo de tecnologia reforça ainda mais a possibilidade de ampliação da geração de energia através de fontes alternativas não fósseis. Portanto, a utilização de biodigestores para a produção energética através da queima do biogás é uma grande oportunidade para a diversificação da matriz energética do país.

PALAVRAS-CHAVE: BIOENERGIA; MODELOS DE BIODIGESTOR; FONTES DE ENERGIA RENOVÁVEIS; VIABILIDADE.

ABSTRACT

The implementation of biogas technology is not only financially viable, but also environmentally friendly as a technology that helps to reduce carbon emissions. The rural population in developing countries is in urgent need of biogas for cooking, lighting and refrigeration, as there is a demand for biogas in these communities, resulting from energy shortage. Through a systematic literature review, using the CAPES Periodic database, and by comparing the different existing digester models, analyzing financial, socioeconomic parameters and the causes of failure to implement these technologies, the Tubular digester stands out for its low costs and ease of construction and operation. The elaboration of a project with the necessary guidelines for the construction and operation of a Tubular digester, coupled with the encouragement of governmental public policies, are factors that will drive the adoption and expansion of renewable technologies in Brazil. For large-scale biogas production, the CSTR model, abbreviated from the continuous stirred tank reactor, has to be highlighted, due to the positive results of deterministic parameters such as the Net Present Value of R \$ 1,888,166.24 and Payback of approximately 3.2 years. Statistical analysis of the probability of successful implementation of this type of technology further reinforces the possibility of expanding power generation through non-fossil alternative sources. Therefore, the use of biodigestors for energy production through the burning of biogas is a great opportunity for the diversification of the country's energy matrix.

KEY-WORDS: BIOENERGY; BIODIGESTOR MODELS; RENEWABLE ENERGY SOURCES; VIABILITY.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Esquema de fluxo de cálculo baseado na equação (2.0)	<u>Pág.08</u>
Figura 2 – Cálculo da Valor Presente Líquido para horizontes iguais de projetos	<u>Pág.08</u>
Figura 3 – Foto do motogerador a biogás modelo Jenbacher	<u>Pág.12</u>
Figura 4 – Distribuição normal padronizada	<u>Pág.23</u>
Figura 5 – Biodigestor Modelo Tubular	<u>Pág.25</u>
Figura 6 – Biodigestor Modelo Indiano	<u>Pág.26</u>
Figura 7 – Biodigestor Modelo Batelada.....	<u>Pág.26</u>
Figura 8 – Biodigestor Modelo Sertanejo.....	<u>Pág.28</u>
Figura 9 – Biodigestor Modelo Chinês.....	<u>Pág.28</u>
Figura 10 – Biodigestor Modelo CSTR.....	<u>Pág.29</u>
Figura 11 – Variação do investimento inicial em função do volume para um digestor modelo Tubular	<u>Pág.37</u>
Figura 12 – Variação do valor presente líquido em função do volume para um digestor modelo Tubular	<u>Pág.37</u>
Figura 13 – Variação da taxa interna de retorno em função do volume para um digestor modelo Tubular...	<u>Pág.37</u>
Figura 14 – Variação do investimento inicial em função do volume para um digestor modelo batelada	<u>Pág.38</u>
Figura 15 – Variação do valor presente líquido em função do volume para um digestor modelo batelada ...	<u>Pág.38</u>
Figura 16 – Variação do investimento inicial em função do volume para um digestor modelo CSTR.....	<u>Pág.39</u>
Figura 17 – Variação do valor presente líquido em função do volume para digestor modelo CSTR.....	<u>Pág.39</u>
Figura 18 – Variação do investimento inicial em função do volume para todos modelos de digestores	<u>Pág.40</u>
Figura 19 – Variação do valor presente líquido em função do volume para todos modelos de digestores	<u>Pág.40</u>
Figura 20 – Variação da taxa interna de retorno em função do volume para todos modelos de digestores ...	<u>Pág.40</u>
Figura 21 – Distribuição das probabilidades do retorno do investimento em um digestor modelo CSTR utilizando a simulação de Monte Carlo	<u>Pág.42</u>
Figura 22 – Distribuição das probabilidades acumuladas do retorno do investimento em um digestor modelo CSTR utilizando a simulação de Monte Carlo	<u>Pág.42</u>
Figura 23 – Sensibilidade do VPL em relação ao investimento inicial	<u>Pág.43</u>
Figura 24 – Sensibilidade do VPL em relação ao fluxo de caixa total mensal.....	<u>Pág.43</u>
Figura 25 – Sensibilidade do VPL em relação ao número de períodos	<u>Pág.44</u>
Figura 26 – Sensibilidade do VPL em relação ao custo mensal de manutenção	<u>Pág.44</u>
Figura 27 – Sensibilidade do VPL em relação a venda de biofertilizante	<u>Pág.44</u>
Figura 28 – Sensibilidade do VPL em relação a comercialização de energia	<u>Pág.45</u>
Figura 29 – Sensibilidade do VPL em relação a venda de créditos de carbono	<u>Pág.45</u>
Figura 30 – Sensibilidade da TIR em relação ao investimento inicial	<u>Pág.46</u>
Figura 31 – Sensibilidade da TIR em relação ao fluxo de caixa total mensal	<u>Pág.46</u>
Figura 32 – Sensibilidade da TIR em relação ao número de períodos	<u>Pág.46</u>
Figura 33 – Sensibilidade da TIR em relação ao custo mensal de manutenção	<u>Pág.47</u>
Figura 34 – Sensibilidade da TIR em relação a venda de biofertilizante	<u>Pág.47</u>
Figura 35 – Sensibilidade da TIR em relação a comercialização de energia.....	<u>Pág.47</u>
Figura 36 – Sensibilidade da TIR em relação a venda de créditos de carbono	<u>Pág.48</u>

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Artigos encontrados em consultas no portal de periódicos da CAPES/MEC	<u>Pág.04</u>
Tabela 2 – Referências para cada tipo de digestor de pequena escala	<u>Pág.04</u>
Tabela 3 – Referências para cada tipo de digestor de larga escala	<u>Pág.05</u>
Tabela 4 – Parâmetros iniciais adotados.....	<u>Pág.05</u>
Tabela 5 – Tabela para cálculo da taxa de câmbio	<u>Pág.06</u>
Tabela 6 – Inflação mensal brasileira, em porcentagem, desde 2014.....	<u>Pág.07</u>
Tabela 7 – Cotação de preços para botijão de GLP 13 kg entre fornecedores locais	<u>Pág.10</u>
Tabela 8 – Benefício gerado com a aplicação de biofertilizante	<u>Pág.11</u>
Tabela 9 – Tarifas médias de fornecimento de energia por região praticadas em 2019	<u>Pág.12</u>
Tabela 10 – Linhas de crédito para produtores rurais.....	<u>Pág.18</u>
Tabela 11 – Rendimento esperado para cada tipo de investimento	<u>Pág.19</u>
Tabela 12 – Critérios para aferir a viabilidade econômica dos modelos de digestores	<u>Pág.21</u>
Tabela 13 – Probabilidade e distribuição acumulada relacionada a cada variável	<u>Pág.23</u>
Tabela 14 – Procedimentos para realização da análise de sensibilidade	<u>Pág.24</u>
Tabela 15 – Parâmetros encontrados para cada tipo de digestor de pequena escala.....	<u>Pág.30</u>
Tabela 16 – Conversão monetária e correção inflacionária para os digestores de pequena escala.....	<u>Pág.30</u>
Tabela 17 – Parâmetros encontrados para cada tipo de digestor em escala industrial	<u>Pág.31</u>
Tabela 18 – Cálculo da viabilidade econômica para cada tipo de digestor	<u>Pág.31</u>
Tabela 19 – Cálculo do fluxo de caixa para cada tipo de digestor de larga escala para o cenário 1	<u>Pág.32</u>
Tabela 20 – Cálculo da viabilidade econômica para cada modelo de digestor de larga escala para cenário 1	<u>Pág.32</u>
Tabela 21 – Comparação entre TIR e TMA para o cenário 1.....	<u>Pág.32</u>
Tabela 22 – Cálculo do fluxo de caixa para cada tipo de digestor de larga escala para o cenário 2.....	<u>Pág.33</u>
Tabela 23 – Cálculo da viabilidade econômica para cada modelo de digestor de larga escala para cenário 2	<u>Pág.33</u>
Tabela 24 – Comparação entre TIR e TMA para o cenário 2.....	<u>Pág.34</u>
Tabela 25 – Parâmetros operacionais dos diferentes tipos de digestor	<u>Pág.34</u>
Tabela 26 – Dados utilizados na análise gráfica.....	<u>Pág.36</u>
Tabela 27 – Cenários probabilísticos da variação do investimento inicial, venda dos fertilizantes e venda de energia excedente	<u>Pág.41</u>
Tabela 28 – Probabilidade e distribuição acumulada relacionada a cada variável	<u>Pág.41</u>
Tabela 29 – Resultados da aplicação do Método de Monte Carlo.....	<u>Pág.41</u>
Tabela 30 – Distribuição de frequência obtida para o a simulação	<u>Pág.41</u>

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO.....	1
2.	OBJETIVOS.....	3
2.1	OBJETIVO GERAL.....	3
2.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	3
3.	METODOLOGIA	4
3.1	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	4
3.2	COMPARAÇÃO DE DADOS	5
3.3	CONVERSÃO MONETÁRIA	6
3.4	ATUALIZAÇÃO INFLACIONÁRIA DE VALORES.....	6
3.5	ANÁLISE DA VIABILIDADE ECONÔMICA	7
3.5.1	VALOR PRESENTE LÍQUIDO	7
3.5.2	CUSTO DE MANUTENÇÃO	9
3.5.3	RECEITA MENSAL.....	9
3.5.4	FLUXO DE CAIXA	9
3.5.5	BOTIJÕES DE GÁS	10
3.5.6	BIOFERTILIZANTES.....	11
3.5.7	GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA.....	11
3.5.8	CRÉDITOS DE CARBONO	13
3.5.9	EMPRÉSTIMO.....	13
3.5.10	TAXA INTERNA DE RETORNO.....	14
3.5.11	PAYBACK.....	15
3.6	INVESTIMENTO EQUIVALENTE.....	15
3.6.1	POLÍTICAS PÚBLICAS.....	16
3.6.2	DIGESTORES DE LARGA ESCALA.....	19
3.7	ANÁLISE GRÁFICA.....	19
3.8	TOMADA DE DECISÃO	21
3.8.1	PRODUTO DO MESTRADO PROFISSIONAL	22
3.8.2	ANÁLISE DE MONTE CARLO	22
3.8.3	ANÁLISE DE SENSIBILIDADE.....	24
4.	RESULTADOS	25
4.1	TIPO DE DIGESTORES.....	25
4.1.1	TUBULAR.....	25
4.1.2	INDIANO	26
4.1.3	BATELADA OU DIGESTOR A SECO	27
4.1.4	SERTANEJO	27
4.1.5	CHINÊS.....	28
4.1.6	CSTR.....	29
4.2	DADOS COLETADOS.....	30
4.2.1	DIGESTORES DE PEQUENA ESCALA	30
4.2.2	DIGESTORES DE LARGA ESCALA.....	31
4.3	ANÁLISE DA VIABILIDADE ECONÔMICA	31
4.3.1	DIGESTORES DE PEQUENA ESCALA	31
4.3.2	DIGESTORES DE LARGA ESCALA.....	32
4.4	TOMADA DE DECISÃO	34
4.4.1	DIGESTORES DE PEQUENA ESCALA	34
4.4.2	DIGESTORES DE LARGA ESCALA.....	35
4.5	PRODUTO DO MESTRADO PROFISSIONAL	35
4.6	ANÁLISE GRÁFICA.....	36
4.6.1	LINHAS DE TENDÊNCIA MODELO TUBULAR.....	36
4.6.2	LINHAS DE TENDÊNCIA MODELO BATELADA	38
4.6.3	LINHAS DE TENDÊNCIA MODELO CSTR.....	38
4.6.4	LINHAS DE TENDÊNCIA GERAL	39
4.7	MÉTODO DE MONTE CARLO.....	41
4.8	ANÁLISE DE SENSIBILIDADE	43
4.8.1	SENSIBILIDADE DO VPL.....	43
4.8.2	SENSIBILIDADE DA TIR	45
4.9	BARREIRAS PARA O SUCESSO DE DIGESTORES	48
5.	DISCUSSÃO.....	49
6.	CONCLUSÃO.....	51
	REFERÊNCIAS.....	52
	ANEXO I – PROJETO DIGESTOR TUBULAR.....	56
	ANEXO II – ORÇAMENTO ESTIMATIVO.....	58
	ANEXO III – CRONOGRAMA FÍSICO FINANCEIRO.....	60
	ANEXO IV – LISTA DE MATERIAIS.....	61

1. INTRODUÇÃO

A crescente demanda mundial por energia e o aumento da geração de resíduos trouxeram a necessidade da implantação do conceito de sustentabilidade, tanto nos processos de produção energética quanto no gerenciamento de resíduos. Atualmente cerca de 80% da energia gerada no mundo é oriunda de combustíveis fósseis (IEA, 2016), conseqüentemente grandes quantidades de gases efeito estufa ainda são lançados na atmosfera e aos poucos os suprimentos primários não renováveis de energia, como petróleo e gás natural, se tornam escassos. Segundo Martí-Herrero *et al.* (2014) o biogás gerado através de resíduos terá um papel vital no futuro para compor a matriz energética mundial como alternativa aos combustíveis fósseis, Moura (2012) explica que isso se deve ao fato do biogás ser uma fonte renovável versátil, ou seja, pode ser usada para geração de energia, calor, ou como combustível de veículos substituindo o gás natural.

O biogás é uma mistura de gases rica em metano produzido por microrganismos a partir da matéria orgânica através da digestão anaeróbia que, segundo Chernicharo (2007), é um processo de mineralização da matéria orgânica em condições de ausência de oxigênio livre. O biogás é constituído principalmente por metano (CH_4 - 50 a 75%), dióxido de carbono (CO_2 - 25 a 45%) e sulfeto de hidrogênio (H_2S), geralmente saturado em vapor d'água (H_2O) e com presença de traços de nitrogênio (N_2) e outros compostos (RISE-AT, 1998 apud PROBIOGÁS, 2015).

Percebe-se uma tendência das pesquisas envolvendo biogás, geralmente são feitas através da coleta de dados experimentais gerados através da construção e operação de digestores de pequena escala, normalmente com volumes menores do que 20 m^3 (WAMWEA, 2017), pois digestores de pequena escala possuem menor exigência tecnológica, menor investimento para serem construídos e operados, e maior facilidade de construção, operação e manutenção. Tecnologias de larga escala são menos divulgadas por serem tratadas como “segredos industriais”, isso faz com que digestores de pequena escala sejam facilmente testados e estudados, produzindo grande quantidade de aprendizado e conhecimento.

Alguns países se destacam pelo estudo, desenvolvimento e aperfeiçoamento de biodigestores, como Bolívia, Brasil, China, Etiópia, Índia e diversos países da União Europeia (MARTÍ-HERRERO *et al.*, 2014; MITTAL *et al.*, 2018; DEGANUTTI *et al.*, 2002; SCARLAT *et al.*, 2018; KELEBE *et al.*, 2017). Esses países têm em comum o incentivo à produção de biogás em escala rural e industrial, seja como incentivo fiscal, como criação de políticas

públicas para promover o aumento do consumo da energia de fontes renováveis e de combustíveis “limpos”, ou como a delimitação de roteiros e medidas para auxiliar o desenvolvimento do panorama das energias renováveis.

Devido ao acesso limitado a serviços modernos de energia, populações rurais dependem em grande parte de combustíveis de baixa qualidade (GOSENS *et al.*, 2013). Segundo Ali *et al.* (2013) a população rural dos países em desenvolvimento precisa urgentemente de biogás para cozimento, iluminação e aquecimento. A adoção do biogás não é apenas financeiramente viável, mas também favorável ao meio ambiente, como uma tecnologia que ajuda a reduzir as emissões de gases efeito estufa (ABBAS *et al.*, 2017). Portanto, existe uma demanda por biogás nessas comunidades, que advém de uma deficiência energética de origem rural. Além disso, os pesquisadores sinalizam a necessidade e importância da difusão de fontes alternativas de energia.

Baseando-se nessa crescente demanda por biogás, aliada a necessidade de difusão das fontes alternativas de energia, esse trabalho tem por objetivo realizar uma revisão bibliográfica sobre os biodigestores de baixo custo para produção de biogás em áreas rurais, a fim de determinar qual a melhor tipo de digestor para produção de biogás em escala rural no Brasil, bem como elaborar uma cartilha com as diretrizes necessárias para construção, operação e manutenção de um projeto de biodigestor de pequena escala para famílias rurais no Brasil e delimitar as barreiras para o sucesso de projetos de biodigestores rurais.

Devido à importância estratégica dos biodigestores de larga escala na sua consolidação quanto matriz energética alternativa, em substituição as fontes convencionais como derivados de petróleo, hidro e termo elétricas, esse trabalho traz uma análise da viabilidade dos modelos de digestores para produção de energia através da queima do biogás, bem como um modelo para estimar a variação dos parâmetros dessas tecnologias em função da ampliação de suas escalas.

2. OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

Analisar a viabilidade econômica de modelos de biodigestores para a produção de biogás.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Realizar uma revisão bibliográfica sobre os diferentes modelos de biodigestores;

Comparar os dados obtidos para determinar qual o modelo de digestor mais vantajoso para produção de biogás dependendo da escala do projeto;

Delimitar barreiras para o sucesso de projetos de implantação de biodigestores;

Projetar e elaborar uma estimativa de custos para implantação de um biodigestor de pequena escala.

3. METODOLOGIA

3.1 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A revisão bibliográfica é realizada a partir de uma busca sistemática por artigos publicados a partir de 2013 no banco de dados do portal de periódicos da CAPES/MEC, que abrange as seguintes bases de conhecimento: *Scopus*, *Springer*, *Science Direct* e *Directory of Open Access Journals (DOAJ)*. O processo consiste em um conjunto de buscas usando palavras chaves diretamente relacionadas com o tema proposto, seguido da seleção de textos cujo conteúdo realmente pertencem ao universo de informações sobre o tema. Os artigos fora do escopo foram manualmente selecionados e retirados, conforme a Tabela 1.

Tabela 1 – Artigos encontrados em consultas no portal de periódicos da CAPES/MEC.

Termos Buscados	Nº de Artigos	Artigos Relevantes
“biogas” and “rural” and “low scale”	22	10
“biogas” and “household” and “dissemination”	15	6
“biogas” and “effective factors” and “barriers”	14	3
“biogas” and “development” and “low cost”	9	4
“industrial” and “large scale” and “high cost”	12	6

Os artigos de Guendouz *et al.*, (2010) e Mattos e Farias Júnior (2011), foram utilizados para complementar a base de dados, devido a sua importância regional ou para suprir eventual falta de dados. Os artigos considerados relevantes para o presente estudo foram utilizados para levantar as informações sobre os diferentes tipos de digestores e, em seguida, organizados de acordo com sua escala de projeto. A Tabela 2 mostra as referências utilizadas para cada modelo de digestor de pequena escala, também chamados de digestores de escala rural.

Tabela 2 – Referências para cada tipo de digestor de pequena escala.

Tipo de Digestor	Referências
Tubular	MARTÍ-HERRERO <i>et al.</i> , (2014), MARTÍ-HERRERO <i>et al.</i> , (2018)
Indiano	YORK <i>et al.</i> , (2016), MITTAL <i>et al.</i> , (2018)
Batelada	GUENDOUZ <i>et al.</i> , (2010), QIAN <i>et al.</i> , (2016)
Sertanejo	MATTOS e FARIAS JÚNIOR (2011)
Chinês	WAMWEA (2017), QU <i>et al.</i> , (2013)

A Tabela 3 mostra as referências utilizadas para cada modelo de digestor de larga escala, também chamados de digestores de escala industrial.

Tabela 3 – Referências para cada tipo de digestor de larga escala.

Tipo de Digestor	Referências
Industrial	
Tubular	CERVI <i>et al.</i> , (2010)
Indiano	NDA ¹
Batelada	OLIVEIRA (2019)
Sertanejo	NDA ¹
CSTR ²	WANG <i>et al.</i> , (2014)

¹NDA: Dados não encontrados para determinado modelo de digestor;

²Continuous-flow Stirred Tank Reactor (CSTR).

3.2 COMPARAÇÃO DE DADOS

Utilizando as referências contidas nas Tabelas 2 e 3, levantou-se os parâmetros iniciais para cada modelo de digestor. Os parâmetros iniciais foram estabelecidos utilizando critérios de recorrência, conveniência, necessidade e importância, baseando-se no levantamento feito por QU *et al.* (2013). Na Tabela 4 encontram-se os parâmetros iniciais adotados bem como o entendimento acerca de cada um deles.

Tabela 4 – Parâmetros iniciais adotados.

Parâmetro Inicial	Descrição
Investimento Inicial	Desembolso em dinheiro feito na data de início do investimento que cobre todos materiais e a instalação de um determinado modelo de digestor;
Produtividade Média ²	Quantidade em metros cúbicos de biogás produzida ao final de 24 horas operação de um determinado modelo de digestor;
Demanda de Biomassa Seca	Quantidade em metros cúbicos de biomassa seca por dia, necessária para manter constante a produtividade média de biogás de um determinado modelo de digestor;
Demanda de Água	Quantidade em metros cúbicos de água por dia, necessária para manter constante a produtividade média de biogás de um determinado modelo de digestor;
Vida Útil ¹	Duração estimada da longevidade de determinado modelo de digestor;
Volume	Volume total de determinado modelo de digestor;
Tipo de Biomassa	Tipo de biomassa inserida em determinado modelo de digestor diariamente, para manter constante a produtividade média;
Complexidade de Construção	Grau de dificuldade para se construir determinado modelo de digestor;
Complexidade de Operação	Grau de dificuldade para se operar e dar manutenção a determinado modelo de digestor.

¹Para efeitos de cálculo, considera-se que ao término da vida útil o modelo de digestor é considerado inutilizado, ou seja, extingue-se a capacidade de produção biogás. Além disso, os equipamentos e materiais que os constituem, não tem nenhum valor monetário residual;

²A quantidade que atende o requerimento diário de uma família varia de 0,35 até 0,6 m³ (WAHYUNI *et al.*, 2018; WAMEA, 2017).

Em seguida os parâmetros iniciais são comparados entre os diferentes tipos de digestores. Dados muito discrepantes da realidade ou com baixo grau de confiabilidade foram eliminados a fim de impedir a propagação de erros intrínsecos (MINGOTI *et al.*, 2014).

3.3 CONVERSÃO MONETÁRIA

Devido ao fato de que os artigos utilizados como referência foram produzidos em diferentes países, portanto utilizando moedas locais variadas em suas publicações, faz-se necessário converter todos os valores encontrados para uma única moeda, para que os valores encontrados possam ser devidamente comparados. No presente estudo, as diferentes moedas são convertidas para Real, utilizando uma taxa de câmbio média (BACEN, 2018) referente ao ano em que o trabalho foi publicado (Tabela 5).

Tabela 5 – Tabela para cálculo da taxa de câmbio.

Moeda ¹	ANO	JAN	FEV	MAR	ABR
Dólar Americano (US\$)	2014	2,347	2,3924	2,3638	2,2257
Dólar Americano (US\$)	2016	3,8711	3,9885	3,7116	3,5276
Rúpia indiana (INS)	2017	3,2034	3,0779	3,1629	3,1269

Moeda	ANO	MAI	JUN	JUL	AGO
Dólar Americano (US\$)	2014	2,2166	2,2347	2,2195	2,269
Dólar Americano (US\$)	2016	3,5041	3,4768	3,2656	3,1672
Rúpia indiana (INS)	2017	3,1011	3,2836	3,1899	3,1976

Moeda	ANO	SET	OUT	NOV	DEZ
Dólar Americano (US\$)	2014	2,3401	2,4316	2,6136	2,6717
Dólar Americano (US\$)	2016	3,3326	3,1864	3,4446	3,383
Rúpia indiana (INS)	2017	3,1255	3,1572	3,2802	3,3176

¹Cálculo da Taxa de Câmbio. Fonte: BACEN, 2018. Banco Central do Brasil - Cotações e Boletins. Disponível em: <<https://www4.bcb.gov.br/pec/taxas/port/ptaxnpsq.asp?id=txcotacao&id=txcotacao>>

3.4 ATUALIZAÇÃO INFLACIONÁRIA DE VALORES

Os valores encontrados não podem ser equiparados antes de promovida a correção inflacionária (EPPS, 1963), conforme a equação (1.0), utilizando a inflação mês a mês (Tabela 6), desde a data da publicação do trabalho em periódicos até a presente data.

$$VC_{n+1} = VSC_n \times \left[1 + \left(\frac{\text{Inflação}_n}{100} \right) \right] \quad \text{Eq. (1.0);}$$

Em que:

VC_{n+1} : é o valor corrigido no mês “ $n + 1$ ”;

VSC_n : é o valor sem correção no mês “ n ”;

Inflação_n : é a inflação referente ao mês “ n ” em porcentagem, conforme a Tabela 6;

n : mês referente ao valor sem correção.

Tabela 6 – Inflação mensal brasileira, em porcentagem, desde 2014. Fonte: IBGE, 2018.

Mês / Ano	2014	2015	2016	2017	2018
JAN ¹	0,55	1,24	1,27	0,38	0,29
FEV	0,69	1,22	0,90	0,33	0,32
MAR	0,92	1,32	0,43	0,25	0,09
ABR	0,67	0,71	0,61	0,14	0,22
MAI	0,46	0,74	0,78	0,31	0,40
JUN	0,40	0,79	0,35	-0,23	1,26
JUL	0,01	0,62	0,52	0,24	0,33
AGO	0,25	0,22	0,44	0,19	-0,09
SET	0,57	0,54	0,08	0,16	0,48
OUT	0,42	0,82	0,26	0,42	0,45
NOV	0,51	1,01	0,18	0,28	-
DEZ	0,78	0,96	0,30	0,44	-

¹Inflação mensal baseada no Índice de Preços ao Consumidor Amplo (IPCA), produzido pelo Sistema Nacional de Índices e Preços ao Consumidor (SNIPC) com base em estabelecimentos comerciais e de prestações de serviços, em diferentes regiões metropolitanas do Brasil.

Este procedimento deve ser repetido quantos períodos forem a defasagem entre a data atual e a data de publicação do trabalho científico de onde é retirado a referência monetária, mês a mês.

3.5 ANÁLISE DA VIABILIDADE ECONÔMICA

Com base nos dados levantados (Tabela 4), e a após aplicação da metodologia presente nos itens 3.3 e 3.4, realizou-se a análise da viabilidade econômica para os diferentes modelos de digestores, utilizando-se de parâmetros determinísticos conforme apresentado em sequência.

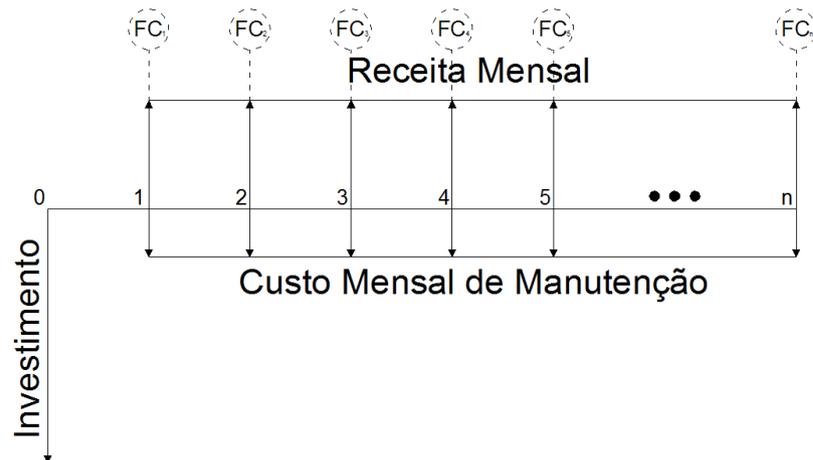
3.5.1 VALOR PRESENTE LÍQUIDO

O valor presente líquido (VPL) é a fórmula econômico-financeira capaz de determinar o valor presente de pagamentos futuros descontados a uma taxa de juros apropriada, menos o custo do investimento inicial, e pode ser definido como a soma algébrica dos valores descontados do fluxo de caixa a ele associado (SILVA e FONTES, 2005), de acordo com a equação (2.0).

$$VPL = -Invest + \frac{FC_1}{(1+i)} + \frac{FC_2}{(1+i)^2} + \dots + \frac{FC_n}{(1+i)^n} \quad Eq. (2.0)$$

A Figura 1 mostra o esquema do fluxo de caixa padrão adotado para determinar o valor presente líquido (VPL).

Figura 1 – Esquema de fluxo de cálculo baseado na equação (2.0).



Em que:

VPL: Valor presente líquido do fluxo de caixa referente a um modelo de digestor;

Invest: Investimento inicial necessário para a construção de um modelo de digestor;

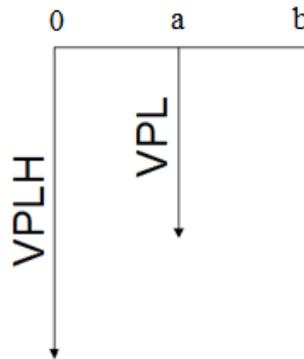
FC_n : Fluxo de caixa em um determinado mês “n”;

i: Taxa de rendimento de um investimento.

Eventualmente, quando a vida útil dos digestores comparados forem diferentes, será necessário equiparar os fluxos de caixa, calculando o VPL para horizontes equivalente de projeto, ou seja, fazer com que os fluxos de caixas tenham o mesmo número de períodos, sempre relativo ao maior período dentre eles, de acordo com a equação (3.0) (SILVA e FONTES, 2005).

$$VPLH = VPL + \frac{VPL}{(1+i)^{b-a}} \quad Eq. (3.0)$$

Figura 2 – Cálculo da Valor Presente Líquido para horizontes iguais de projetos.



Em que:

VPLH: Valor presente líquido para horizontes iguais de projeto do fluxo de caixa referente a um modelo de digestor;

VPL: Valor presente líquido do fluxo de caixa referente a um modelo de digestor;

a: Menor vida útil de um modelo de digestor;

b: Maior vida útil de um modelo de digestor;

i: Taxa de rendimento de um investimento.

3.5.2 CUSTO DE MANUTENÇÃO

O custo de manutenção e operação anual para cada modelo de digestor foi estimado com base nas referências das Tabelas 2 e 3, sendo que, para modelos de pequena escala foi definido em 10% (dez por cento) do valor do investimento inicial (YORK *et al.*, 2016). Todavia, esse valor não reflete com fidelidade os custos de manutenção e operação para diferentes escalas de biodigestores.

Logicamente, quanto maior for a escala, maiores e mais numerosos são os equipamentos. Grandes projetos de biodigestores demandam maiores investimentos iniciais, o que faz com que os investidores queiram ter maior controle sobre as variáveis, anexando diversas tecnologias para este fim, o que encarece o custo da manutenção. Além disso, nas grandes plantas de biogás, deve-se evitar ao máximo o efeito corrosivo do H₂S produzido, implantando filtros de limalha de ferro, ou outra tecnologia que faça a extração do enxofre de modo eficiente. Por isso, deve ser considerado um custo de manutenção e operação diferenciado nesses casos, incluindo também a mão de obra necessária para execução desses serviços.

Martins e De Oliveira (2011) consideram que o custo de manutenção e operação anual para um digestor de 496 m³ é de aproximadamente 25% (vinte e cinco por cento) do valor do investimento inicial, valor compatível com esse tipo de escala e definido neste trabalho para os digestores de larga escala.

3.5.3 RECEITA MENSAL

Para os digestores de pequena escala a receita mensal foi considerada como sendo a quantia em dinheiro que se deixa de gastar com a compra de botijões de gás, substituindo-o pelo biogás produzido.

Com relação aos digestores de larga escala, a composição da receita mensal foi feita sobre o ganho com energia elétrica excedente produzida, o ganho com a venda de biofertilizante e o ganho com a venda de créditos de carbono. Além disso, como será visto adiante, pode-se considerar o pagamento de juros nas contas como uma receita negativa.

3.5.4 FLUXO DE CAIXA

O fluxo de caixa mensal de um investimento representa o retorno financeiro mês a mês de determinado projeto, no caso para cada modelo de digestor. Para determiná-lo devem-se considerar as entradas (ganhos financeiros) e as saídas (custos) conforme a equação (4.0).

$$FC_n = Receita_{Mensal} - Custo_{Mensal} \quad Eq. (4.0)$$

Em que:

FC_n : Fluxo de Caixa em um determinado mês “n”;

$Receita_{Mensal}$: Somatório das entradas mensais em determinado fluxo de caixa;
 $Custo_{Mensal}$: Despesas mensais com de determinado modelo de biodigestor em reais.

Para os digestores de pequena escala, temos as equações (5.0) e (6.0).

$$Receita_{Mensal} = D \quad Eq. (5.0)$$

$$Custo_{Mensal} = MO \quad Eq. (6.0)$$

Em que:

D : Quantia em dinheiro que se deixa de gastar com a compra de botijões de gás em reais.

MO : Valor mensal gasto com a manutenção e operação de determinado modelo de digestor em reais;

Em contrapartida, para os digestores de larga escala, temos as equações (7.0) e (8.0).

$$Receita_{Mensal} = BF + E + CC \quad Eq. (7.0)$$

Em que:

BF : Valor mensal obtido com a venda de biofertilizante em reais;

E : Valor mensal obtido com a produção de energia excedente em reais;

CC : Valor mensal obtido com a comercialização de créditos de carbono em reais;

$$Custo_{Mensal} = MO + J \quad Eq. (8.0)$$

Em que:

MO : Valor mensal gasto com a manutenção e operação de determinado modelo de digestor em reais;

J : Valor mensal gasto com o pagamento das parcelas de um empréstimo em reais;

3.5.5 BOTIJÕES DE GÁS

Considerando que o uso de 0,55 m³/dia de biometano equivale a 1 botijão de gás liquefeito de petróleo (GLP) de 13 kg por mês, cujo preço é determinado através de cotação com fornecedores locais, conforme a Tabela 7.

Tabela 7 – Cotação de preços para botijão de GLP 13 kg entre fornecedores locais.

Identificação dos Fornecedores	Fornecedor:	Fornecedor A	Fornecedor B	Fornecedor C	Fornecedor D
	Razão Social:	Gás Tropical	Circular Gás	Areião Gás	Ultragaz
	Telefone:	(62) 3233-4630	(62) 3932-9040	(62) 3281-0004	(62) 3202-1212
Valor Unitário	Retirada ¹	70,00	75,00	72,00	75,00
GLP Botijão de 13 kg	Entrega ²	75,00	78,00	76,00	78,00

¹Preço do botijão de 13 kg sem acréscimo da taxa de entrega;

²Preço do botijão de 13 kg somado a taxa de entrega.

Para os cálculos, foi considerado o menor preço obtido para o botijão de GLP 13kg sem a taxa de entrega, ou seja, R\$ 70,00.

3.5.6 BIOFERTILIZANTES

Diferentemente dos pequenos produtores rurais familiares, que em sua maioria acabam não transformando o produto secundário dos biodigestores, no caso o biofertilizante, em renda extra, os investidores de outras escalas financeiras optam pela venda deste subproduto para auxiliar nos custos. Quanto maior a escala do biodigestor, maior a produção de biofertilizante, por isso a atração dos investidores com esse tipo de negócio já que, ao contrário dos pequenos produtores rurais, acabam gerando grandes quantidades desse produto. Portanto é de grande valia a consideração do lucro com a venda dos biofertilizantes na análise de viabilidade econômica.

Cervi (2009) analisou amostras de biofertilizantes produzidos por um biodigestor Tubular, as quais apresentaram concentrações de macronutrientes iguais a: Nitrogênio ($0,91 \text{ g.L}^{-1}$), Fósforo ($0,33 \text{ g.L}^{-1}$), Potássio ($0,30 \text{ g.L}^{-1}$). Assim, estima-se o benefício com a produção de biofertilizante em função dos preços médios dos nutrientes praticados pelo mercado de janeiro de 2018 até março de 2019 (Tabela 8).

Tabela 8 – Benefício gerado com a aplicação de biofertilizante. Adaptado de CERVI (2009).

Insumo	Concentração (%)	Preço do Fertilizante (R\$.t ⁻¹) ¹	Total (R\$.t ⁻¹)
Ureia (45% N)	59,09	2.045,18	1.208,49
Superfosfato Simples (20% P ₂ O ₅)	21,43	1.345,78	288,40
Cloreto de Potássio (60% K ₂ O)	19,48	2.058,53	401,00
Total			1.897,90

¹Fonte: INSTITUTO DE ECONOMIA AGRÍCOLA, 2019.

3.5.7 GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA

Reatores em larga escala, na grande maioria dos artigos pesquisados, trabalham em parceria com a geração de energia, devido à grande quantidade de biogás produzido e pelo fato de que esse tipo de empreendimento envolve grandes quantias de investimento, portanto, do ponto de vista do investidor, todas as possibilidades de ganho financeiro devem ser exploradas até o seu esgotamento. Para isso, são implantados os motogeradores a biogás e as plantas dos digestores são adaptadas para atender as especificações da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL). A Figura 3 contém um exemplo de motogerador a biogás disponível na internet que vem sendo utilizado em vários países, em um total de 560 sistemas de geração de

energia, fornecendo cerca de 2,8 milhões de megawatts-hora de eletricidade por ano, o suficiente para atender a demanda de 800.000 domicílios europeus.

Figura 3 – Foto do motogerador a biogás modelo Jenbacher. General Electric (2019).



Segundo Muniz *et al.* (2017) a exploração do potencial energético em biodigestores de média e larga escala impacta diretamente na viabilidade econômica de implantação dos mesmos, diminuindo o payback desse tipo de investimento, ao passo que as receitas mensais com a venda da energia elétrica para as concessionárias são adicionadas aos cálculos. Ainda segundo este autor, é necessário levar em conta que o gerador de energia não opera a 100%. Segundo Melo *et al.* (2015) a eficiência desse processo é algo em torno de 60% da quantidade de metano produzido. Além disso, 1 m³ de biogás produz em média 5,81 kWh de energia elétrica.

A Tabela 9 demonstra os preços médios das tarifas de energia elétrica trabalhadas em 2019 por região do país.

Tabela 9 – Tarifas médias de fornecimento de energia por região praticadas em 2019.

Classe de Consumo	Centro Oeste	Nordeste	Norte	Sudeste	Sul
Industrial	R\$ 416,76 ¹	R\$ 416,44	R\$ 520,11	R\$ 474,28	R\$ 464,69

¹Fonte: <http://www.aneel.gov.br/a-aneel>. Valores em R\$ por MWh de consumo. Acesso: 26 de maio de 2019.

Deve-se considerar também o consumo específico de biogás pelo grupo gerador, aproximadamente 22 m³ por hora (CERVI *et al.*, 2010), relação entre o volume de biogás consumido pelo grupo gerador e a energia elétrica por ele produzida, valor fornecido pelo fabricante. Dessa maneira, a estimativa do consumo anual de biogás pelo conjunto motor-gerador é feita pela equação (9.0):

$$C_{AB} = C_{EB} \times T \quad \text{Eq. (9.0)}$$

Em que:

C_{AB} : Consumo anual de biogás em m³ por ano;

C_{EB} : Consumo específico de biogás pelo conjunto motor-gerador em m³ por hora;

T : Disponibilidade anual da planta em horas por ano.

O biogás produzido é utilizado diretamente no sistema de conversão de energia elétrica, que é utilizado 10,5 horas por dia, em média. Estima-se a produção em um período de 26 dias por mês ou 312 horas por ano, equivalente a 3.276 horas de operação por ano.

3.5.8 CRÉDITOS DE CARBONO

Segundo o protocolo de Kyoto de dezembro de 1997, os gases de efeito estufa (GEE), foram classificados conforme seu potencial de gases do efeito estufa (PGEE) e, de acordo com a nomenclatura, o Metano (CH₄) possui PGEE = 21 e o Dióxido de Carbono (CO₂) possui PGEE = 1 (MIRANDA *et al.*, 2018). Sendo assim durante a conversão do CH₄ para CO₂ no motorizador ocorre uma redução de 20 vezes no potencial de gases do efeito estufa do metano, o que resulta em 20 créditos carbono (CC) (MIRANDA *et al.*, 2018). Oliveira (2019) afirma que as negociações atuais de preço de crédito de carbono têm um valor médio de US\$10.00 por tonelada e podem ser calculados utilizando a equação (10.0):

$$CC = \frac{PGEE \times V_{gás} \times Dens_{gás}}{1000} \quad Eq. (10.0)$$

Em que:

CC: Créditos de Carbono;

PGEE: Potencial de gases do efeito estufa;

V_{gás}: Volume anual de gás metano em m³;

Dens_{gás}: Densidade do gás metano (0,656 kg/m³).

Algumas linhas de pensamentos defendem a ideia de que os créditos de carbono acabam favorecendo mais ao mercado do que ao ambiente, e outras defendem a ideia de que, os mesmos, são certificados que autorizam aos países desenvolvidos o direito de poluir. No entanto, cada país tem uma cota máxima de créditos de carbono que pode comprar para cumprir as metas do Protocolo de Kyoto; portanto, o assim chamado "direito de poluir" é limitado. Do ponto de vista do investidor, além de influenciar positivamente no fluxo de caixa do investimento, o comércio de créditos de carbono, é usado como uma ferramenta de marketing pelas empresas, que acaba melhorando sua imagem perante a sociedade. Portanto, apesar do benefício trazido ao meio ambiente ser discutível, a venda dos créditos de carbono, ainda sim é um ponto positivo na produção do biogás e que merece ser explorado do ponto de vista econômico.

3.5.9 EMPRÉSTIMO

Com relação a possibilidade de empréstimo serão considerados dois cenários, sendo o primeiro a situação onde 100% (cem por cento) do valor investido inicialmente no projeto de

digestor é obtido através de financiamento. Já no segundo cenário o investidor dispõe de toda quantia necessária para investir inicialmente e não opta pelo empréstimo.

Assim, na consideração em que todo o valor do investimento inicial é obtido através de empréstimo, calcula-se o pagamento de juros mensais utilizando o método da tabela Price, sendo de regime de juros compostos em que as parcelas mensais são sempre iguais até o pagamento total da dívida, conforme a equação (11.0):

$$Parcela_{Mensal} = PV * \frac{j}{1-(1+j)^{-n}} \quad Eq. (11.0)$$

Em que:

$Parcela_{Mensal}$: Valor da parcela paga mensalmente em função do empréstimo em reais;

PV : Valor presente do empréstimo em reais;

j : Taxa de juros de em porcentagem ao mês;

n : Número de períodos em meses.

3.5.10 TAXA INTERNA DE RETORNO

A Taxa Interna de Retorno (TIR), em inglês Internal Rate of Return (IRR), pode ser definida como a taxa de desconto que faz com que o Valor Presente Líquido (VPL) de um projeto seja igual a zero. Ou seja, a Taxa Interna de Retorno é uma métrica usada para avaliar qual o percentual de retorno de um projeto para determinado investidor. Essa taxa é comparada à Taxa Mínima de Atratividade (TMA) para que se decida se o projeto deve ou não ser aceito. Se a TIR for maior que a TMA, significa que o investimento é viável. Em geral, os investidores darão preferência aos projetos que possuem a maior diferença entre a taxa requerida e a taxa interna de retorno.

Segundo Damaceno *et al.* (2017) a TMA depende diretamente da vida útil dos projetos e deve levar em conta o custo de capital investido, risco e o lucro esperado pelos investidores (KUMARAN *et al.*, 2016). Para o cálculo da TIR utiliza-se a equação (12.0) descrita por Casaroto e Kopotike (2008):

$$0 = \sum_{n=0}^t \frac{FC_n}{(1+TIR)^n} \quad Eq. (12.0)$$

Em que:

FC_n : Fluxo de Caixa em um determinado mês “ n ”;

TIR: Taxa Interna de Retorno de determinado investimento.

3.5.11 PAYBACK

O payback, tempo em anos o qual o somatório das receitas ultrapassa o valor do investimento inicial, é calculado através da equação (13.0) (BLANK e TARQUIN, 2008).

$$\text{Payback} = \frac{\text{Invest}}{(\text{Total Mensal} \times 12)} \quad \text{Eq. (13.0)}$$

Em que:

Invest: Investimento inicial para construção de um modelo de digestor;

Total Mensal: Quantia recebida por mês com a implantação de um determinado modelo de digestor.

3.6 INVESTIMENTO EQUIVALENTE

Para a análise da viabilidade econômica dos diferentes modelos de biodigestor é necessário determinar uma taxa de rendimento, variável (*i*) presente nas equações anteriores, para cada projeto. Essa taxa de rendimento, por sua vez, deve equivaler a uma taxa real utilizada no mercado de investimentos futuros que se assemelhe as características dos projetos de biodigestor.

As taxas de rendimento devem possuir a mesma anuência do fluxo de caixa, portanto precisam ser mensais como observado no item 3.5.4. Para a conversão das taxas utilizou-se a equação (14.0).

$$\text{Rendimento}_{a.m.} = \left(\sqrt[12]{1 + \text{Rendimento}_{a.a.}} \right) - 1 \quad \text{Eq. (14.0)}$$

Em que:

Rendimento_{a.m.}: Rendimento convertido em porcentagem ao mês;

Rendimento_{a.a.}: Rendimento esperado conforme o investimento equivalente em porcentagem ao ano.

No presente estudo, definiu-se que, para os digestores de pequena escala, o rendimento equivalente é um investimento de renda fixa, com certificado de depósito bancário (CDB), de resgate financeiro após 10 (dez) anos. Isso equivale a uma taxa (*i*) de 11,28% ao ano (a.a), ou 0,8946% ao mês (TORO, 2018).

O volume do biodigestor construído influencia diretamente no custo do investimento inicial, a exemplo de Cervi *et al.* (2010), que procede com a análise de viabilidade econômica da utilização de biogás produzido em um digestor Tubular de volume igual a 496 m³, onde o custo de sua implantação chega a R\$ 51.537,17. Primeiramente, o volume estudado por Cervi *et al.* (2010) é considerado por QIAN *et al.* (2016) como sendo de larga escala. Sabendo disso, fica claro que as nuances envolvendo os digestores de grande volume serão mais complexas e devem se diferenciar em muito dos digestores de pequena escala.

Portanto, com relação aos digestores de larga escala, o rendimento equivalente foi determinado de forma análoga, porém, considerando investimentos mais robustos, ou seja, que demandassem maiores aportes e ainda considerando a existência ou não do pagamento da taxa de juros, com base nas políticas públicas relativas a implementação de fontes renováveis.

3.6.1 POLÍTICAS PÚBLICAS

A crise mundial do petróleo da década de 70 incentivou a valorização de outras fontes energia e, nesse contexto, o Brasil mostrava-se extremamente dependente (KARLSSON *et al.*, 2014), já que 80% do óleo bruto consumido no país era de fonte externa. Segundo Karlsson *et al.* (2014) as consequências foram imediatas em países importadores, culminando na procura por outras fontes de energia. Descobriu-se a presença de petróleo na Bacia de Campos (Rio de Janeiro) e em 1976 iniciou-se sua exploração. Posteriormente foi implantado o Proálcool e, conseqüentemente, estimulou-se a produção de álcool e deu espaço para outros biocombustíveis, dentre eles o biogás.

Em 1997 surgiu o Projeto de Difusão do Biogás da Empresa Brasileira de Tecnologia e Extensão Rural (EMATER), que não atingiu seus objetivos sob a alegação de falta de conhecimento técnico sobre a construção e operação de biodigestores, alto custo de implantação e manutenção, falta de equipamentos e baixa durabilidade dos equipamentos adaptados para conversão de biogás em energia, ausência de condensadores para água e de filtros para os gases corrosivos gerados no processo, fora a disponibilidade e baixo custo da energia elétrica e do gás liquefeito de petróleo (GLP) (ANDRADE *et al.*, 2002). Segundo Karlsson *et al.* (2014) o sistema político à época também não favoreceu a implantação dos biodigestores, já que o modelo de governo definia os investimentos de acordo com os acontecimentos da crise, o que culminou na desativação de todos os programas que buscavam fontes alternativas de energia vigentes na década de 80.

O interesse pelo biogás voltou a ganhar força nos anos 90 sob a possibilidade de geração de uma energia que pudesse dar suporte à matriz energética, quando eventual aumento no preço do petróleo acontecesse (BARBELI, 1998). Além disso, existia uma preocupação com as questões ambientais e foi nessa época que o país, dentre muitos outros, assinou o Protocolo de Kyoto, que continha uma série de medidas para a diminuição de gases efeito estufa em escala global. Em 2002 foi implantado o Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica (PROIFA), conforme a Lei nº 10.438, de 26 de abril de 2002, para aumentar a geração de energia elétrica a partir de fontes eólica, biomassa e pequenas centrais hidrelétri-

cas (PCH) no Sistema Elétrico Interligado Nacional (SIN), o que rendeu ao país a Certificação de Redução de Emissão de Carbono (KARLSSON *et al.*, 2014).

Depois da pane na distribuição de energia vivenciada em 2009, devido a um problema ocorrido na hidrelétrica de Itaipu, a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) instituiu a Geração Distribuída de Energia, incorporando a energia de outras fontes não hidroelétricas nas redes de distribuição de energia. Com isso, o biogás gerado nas propriedades rurais poderia ser convertido em energia elétrica por meio de geradores e ser inserido nas redes de distribuição (ZILOTTI, 2012).

Recentemente foi instituído o Plano Safra da Agricultura Familiar (Pronaf) 2017/2020, que é um conjunto de ações para o fortalecimento da agricultura familiar, dentre elas o oferecimento de segurança jurídica da terra, com titulação e regularização fundiária, seguro da produção, ações para o Semiárido e Assistência Técnica e Extensão Rural (CORCIOLI e de SIQUEIRA, 2016). Esse plano ainda conta com a disponibilização de linhas de crédito, conforme a Tabela 10, para auxiliar atividades que agreguem renda à produção e aos serviços desenvolvidos pelos beneficiários do Pronaf, como a implantação de biodigestores para produção de biogás.

Dentre as linhas de crédito disponibilizadas pelo Pronaf, as elencadas na Tabela 10, são aquelas passíveis de serem utilizadas para investimentos em biodigestores para produção de biogás. Percebe-se que existem diferentes vultos financeiros para cada linha de crédito, bem como diferentes taxas de juros aos aderidos. Isso acontece devido aos diversos perfis dos investidores, que vão desde empreendimentos individuais feitos por famílias de baixa renda até grandes cooperativas com enorme poder de crédito.

Tabela 10 – Linhas de crédito para produtores rurais.

Fonte: Secretaria Especial de Agricultura Familiar e do Desenvolvimento Agrário (2017).

Linha de Crédito Pronaf	Finalidade do Investimento	Condições	Juros
Agroindústria	Atividades que agreguem renda à produção e aos serviços desenvolvidos pelos beneficiários.	Individual até R\$ 165 mil; Empreendimentos familiares rurais até R\$ 330 mil; Cooperativas acima de R\$ 1 milhão até R\$ 35 milhões com limite de R\$ 45 mil, por associado ativo.	5,5% a.a.
Produtivo Orientado de Investimento	Crédito rural com Ater ¹ para inovação tecnológica, sistemas agroflorestais, convivência com o bioma, sistema de base agroecológica ou orgânica.	De R\$ 18 mil até R \$40 mil, com Ater ¹ remunerada de R\$ 3,3 mil ou R\$ 4,5 mil (região Norte) por família, divididos em 3 parcelas, durante 3 anos.	4,5% a.a.
Eco	Investimento para aproveitamento hidro energético, tecnologia de energia renovável, tecnologias ambientais, projetos de adequação ambiental, adequação ou regularização das unidades familiares à legislação ambiental, implantação de viveiros de mudas.	Até R\$ 165 mil.	2,5% a.a.
Microcrédito Produtivo Rural Grupo “B”	Com a metodologia do PNMPO ² .	Investimento de até R\$ 5 mil e bônus de adimplência de 25% para os primeiros R\$ 15 mil.	0,5% a.a.
Microcrédito Produtivo Rural Grupo “B”	Com a metodologia do PNMPO ² em municípios localizados no Semiárido na área de abrangência da Sude ne – envolvendo projetos de convivência com o bioma.	Investimento de até R\$ 5 mil e bônus de adimplência de 40% para os primeiros R\$ 15 mil.	0,5% a.a.
Microcrédito Produtivo Rural Grupo “B”	Microcrédito rural sem a metodologia do PNMPO**.	Investimento de até R\$ 2,5 mil e bônus de adimplência de 25% para os primeiros R\$ 7,5 mil.	0,5% a.a.

¹Ater – Assistência Técnica e Extensão Rural, serviço de informação e orientação técnica rural;²PNMPO – Programa Nacional de Microcrédito Produtivo Orientado, conforme a Lei 11.110, de 25 de abril de 2005.

A existência de diferentes linhas de crédito demonstra que as oportunidades também são diversificadas e que dependem diretamente do vulto financeiro dos seus investidores, o que confirma a disparidade entre as escalas de dígitos. Portanto, de forma análoga a metodologia utilizada para determinar um rendimento equivalente para os dígitos de pequena escala, pode-se correlacionar o tipo de investimento presente nas linhas de crédito do Pronaf, com

aqueles que sejam compatíveis, desde que respeitadas as nuances dos digestores de larga escala.

3.6.2 DIGESTORES DE LARGA ESCALA

Cada linha de crédito do Pronaf possui um teto de investimento que, para efeito de cálculo, será considerado como valor disponível para uso de cada tipo de investidor. Ainda, deve-se considerar também as eventuais bonificações tratadas na Tabela 10, bem como a taxa de juros do empréstimo, para o cenário que considera que 100% do valor investido é obtido através do financiamento em uma das diversas linhas de crédito.

O rendimento de cada tipo de investimento deve equivaler a um investimento real, do mesmo modo que foi considerado para os digestores de pequena escala, porém compatível com o vulto econômico dos digestores de larga escala, ou seja, igual a um rendimento de um investimento de renda fixa, certificado de depósito bancário (CDB), de mesmo vulto e período de retorno financeiro, conforme a Tabela 11.

Tabela 11 – Rendimento esperado para cada tipo de investimento.

Linha de Crédito Pronaf	Tipo	Limite de Investimento	Juros	Rendimento de Investimento Equivalente ¹	Rendimento Esperado ³
Agroindústria	Cooperativo	R\$ 35.000.000,00	5,50%	11,70%	6,20% ²
Eco	Individual	R\$ 165.000,00	2,50%	9,60%	7,10%
Produtivo Orientado de Investimento	Individual	R\$ 40.000,00	4,50%	9,22%	4,72%
Microcrédito Produtivo Rural Grupo “B”	Individual	R\$ 5.000,00	0,50%	9,05%	8,55%
Microcrédito Produtivo Rural Grupo “B”	Individual	R\$ 2.500,00	0,50%	8,98%	8,48%

¹Fonte: <https://www.xpi.com.br/investimentos>. Baseado em investimentos conforme item 2.4.4. Acesso: 05 de maio de 2019;

²Valores de rendimento ao ano (a.a.);

³Também chamado de taxa mínima de atratividade (TMA).

3.7 ANÁLISE GRÁFICA

Os dados obtidos para os diferentes modelos de biodigestores, podem ser utilizados para estimar a variação dos parâmetros em função do crescimento da escala dos biodigestores com auxílio da equação de regressão quadrática (equação 15.0), de forma análoga a Cancelier *et al.* (2015), comparando os parâmetros em pares, onde os valores obtidos são convertidos em co-

ordenadas (X,Y) de um plano cartesiano a fim de determinar os coeficientes a, b e c de uma equação polinomial do segundo grau:

$$y_i = \beta_0 + \beta_1 x_i + \beta_2 x_i^2 + \epsilon \quad \text{Eq. (15.0)}$$

Em que:

y_i : Valores observados das variáveis dependentes;

x_i : Valores das variáveis independentes;

β_0, β_1 e β_2 : Coeficientes a serem estimados para determinar uma função que represente aproximadamente um conjunto de pontos;

ϵ : Erros experimentais relacionados aos valores observados.

Para obtenção dos coeficientes “ β_0, β_1 e β_2 ”, tais que a equação (16.0) seja mínima, resolve-se pela solução de mínimos quadrados da equação (17.0):

$$SQ = \sum_i [y_i - (\beta_0 + \beta_1 x_i + \beta_2 x_i^2)]^2 \quad \text{Eq. (16.0)}$$

Ou seja:

$$\hat{\beta}_0, \hat{\beta}_1 \text{ e } \hat{\beta}_2 \begin{cases} \frac{dSQ}{d\beta_0} \\ \frac{dSQ}{d\beta_1} \\ \frac{dSQ}{d\beta_2} \end{cases} \quad \text{Eq. (17.0)}$$

Em que:

y_i : Valores observados das variáveis dependentes;

x_i : Valores das variáveis independentes;

β_0, β_1 e β_2 : Coeficientes a serem estimados para determinar uma função que represente aproximadamente um conjunto de pontos.

O coeficiente de determinação, também chamado de “ R^2 ”, é uma medida de ajustamento de um modelo estatístico linear generalizado, como a regressão quadrática, em relação aos valores observados. O R^2 varia entre 0 e 1, indicando, em percentagem, o quanto o modelo consegue explicar os valores observados. Quanto maior o R^2 , mais explicativo é o modelo, ou seja, melhor ele se ajusta à amostra. Cálculo da Soma Total dos Quadrados (SQ_{tot}), ou seja, a soma dos quadrados das diferenças entre a média e cada valor observado, conforme a equação (18.0):

$$SQ_{tot} = \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2 \quad \text{Eq. (18.0)}$$

Em que:

n : Número de parâmetros obtidos;

y_i : Valor real observado;

\bar{y} : Média dos valores observados.

Soma dos Quadrados dos Resíduos (SQ_{res}), que calcula a parte que não é explicada pelo modelo, conforme a equação (19.0):

$$SQ_{res} = \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2 \quad \text{Eq. (19.0)}$$

Em que:

y_i : Valor real observado;

\hat{y}_i : Valor estimado (previsão) de y_i .

Soma dos Quadrados Explicada (SQ_{exp}), indica a diferença entre a média das observações e o valor estimado para cada observação, e soma os respectivos quadrados (equação 20.0). Quanto menor for a diferença, maior poder explicativo detém o modelo.

$$SQ_{exp} = \sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - \bar{y})^2 \quad Eq. (20.0)$$

Portanto:

$$SQ_{tot} = SQ_{exp} + SQ_{res} \quad Eq. (21.0)$$

E, normalizando a equação (20.0):

$$R^2 = \frac{SQ_{exp}}{SQ_{tot}} = 1 - \frac{SQ_{res}}{SQ_{tot}} \quad Eq. (22.0)$$

3.8 TOMADA DE DECISÃO

A partir dos parâmetros obtidos nos itens 3.1 e 3.2 procede-se a tomada de decisão, primeiramente definindo quais modelos de digestores são considerados viáveis economicamente, para depois decidir qual será utilizado nas aplicações futuras deste trabalho. A Tabela 12 mostra os testes para aferir a viabilidade econômica dependendo da escala do projeto.

Tabela 12 – Critérios para aferir a viabilidade econômica dos modelos de digestores.

Escala do Biodigestor	Critérios
Pequena	Produtividade média > 0,35 m ³ Valor presente líquido (VPL) > 0
Larga	Valor presente líquido (VPL) > 0 Taxa interna de retorno (TIR) > Taxa mínima de atratividade (TMA)

Dentre os modelos de digestores considerados viáveis economicamente, seleciona-se aquele considerado o mais vantajoso, ou seja, aquele que possivelmente tem maiores chances de sucesso, maior rentabilidade ou melhor aplicabilidade. Portanto, é considerado como sendo o modelo de digestor mais vantajoso, aquele que possuir maior VPL, maior TIR, menor investimento inicial, menor payback e/ou melhor correspondência com o perfil socioeconômico do investidor alvo. Para cada escala de projeto será escolhido um modelo de digestor mais vantajoso.

3.8.1 PRODUTO DO MESTRADO PROFISSIONAL

O curso de mestrado profissional em Tecnologias de Processos Sustentáveis do IFG exige, como requisito final para sua conclusão, a elaboração de um produto individual para ser apresentado aos membros da banca de defesa. No presente trabalho escolheu-se que o produto final se trata da elaboração de projetos e orçamentos para o modelo de digestor considerado como o mais vantajoso para pequena escala.

Os projetos serão elaborados com base nas especificações contidas nas referências presentes no item 3.1, ou adaptados por ocasião para a realidade de obra. O orçamento será composto de estimativa de custo, estimativa de materiais e cronograma físico-financeiro, com base nas tabelas referenciais para obras civis da Agência Goiana de Transportes e Obras Civis mais recentes (AGETOP CIVIL 2018).

3.8.2 ANÁLISE DE MONTE CARLO

Até então, as considerações feitas para o presente estudo baseiam-se em valores médios obtidos através da literatura. Esses valores não são constantes ao longo dos meses e podem ter grandes amplitudes de variação, tanto entre modelos de digestores diferentes quanto entre modelos iguais. Isso acontece, principalmente, devido a dependência de variáveis como a temperatura do ambiente e a composição química da biomassa, que afetam a produtividade dos digestores. Além disso, os preços de mercado variam muito a longo prazo, o que causa variações no o custo de manutenção, no preço de venda dos fertilizantes e principalmente na comercialização de energia excedente. Eventualmente há a necessidade de manutenções não programadas em função de problemas no digestor, principalmente nos filtros e devido a sensibilidade do substrato. Por último, os dados utilizados por outros autores estão sujeitos a imprecisões intrínsecas, como as de medições e aproximações, bem como a estimativas que não refletem a realidade dos fatos.

A aplicação do método de Monte Carlo para o modelo de digestor de larga escala mais vantajoso, auxilia na previsibilidade do investimento e determina a sua probabilidade de sucesso baseando-se em diversos cenários. Os cenários, bem como suas probabilidades de acontecerem de fato, podem variar entre pessimistas, médias e otimistas, de forma análoga a Cancellier *et al.* (2015), que calcula os efeitos estatísticos das variáveis relacionadas a qualidade da biomassa.

O primeiro autor a ilustrar a aplicabilidade da Simulação de Monte Carlo à teoria financeira foi David Hertz em seu artigo Risk Analysis in Capital Investment, publicado em 1964.

O método de simulação de Monte Carlo consiste em gerar números aleatórios para cada variável que afeta o fluxo de caixa a partir de suas respectivas distribuições de probabilidades.

Estima-se, para cada variável que influencia o diagrama de fluxos de caixa do investimento, seu intervalo de variação possível. Daí é estabelecida uma distribuição de probabilidades correspondente que, em seguida, são transformadas em uma distribuição de probabilidades acumuladas, de acordo com a Tabela 13.

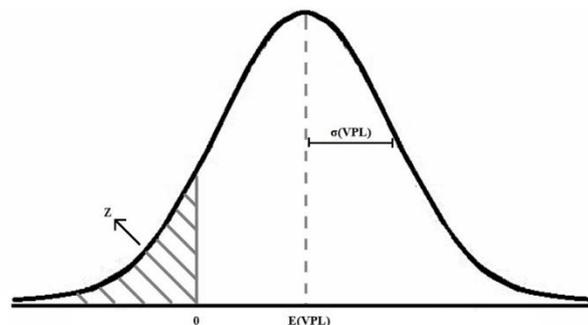
Tabela 13 – Probabilidade e distribuição acumulada relacionada a cada variável.

Variável	Probabilidade	Dist. Acumulada
X1	P1	P1
X2	P2	P1+P2
X3	P3	P1+P2+P3
...
Xn	Pn	P1+P2+P3...+Pn

Deve-se selecionar, ao acaso, valores para cada variável, de acordo com as suas probabilidades de ocorrência, e então, calcular o valor presente líquido (VPL) ou taxa interna de retorno (TIR) ou qualquer outra medida de atratividade para o projeto, para cada combinação de valores obtida. Se houver dependência entre variáveis, esse fato deve ser considerado de forma a existir correspondência entre os valores selecionados. Efetua-se esta operação repetidas vezes, até obter uma distribuição de probabilidades do retorno do investimento.

Para o cálculo da probabilidade de o investimento ser inviável trabalha-se com a distribuição normal padronizada “z”, de acordo com a Figura 4.

Figura 4 – Distribuição normal padronizada.



Sendo Z a probabilidade de o investimento ser inviável (CANCELIER *et al.*, 2015):

$$Z = \frac{VPL - E(VPL)}{\sigma(VPL)} \quad \text{Eq. (23.0)}$$

$$P(VPL < 0) = P(Z < Z_{\text{encontrado}}) \quad \text{Eq. (24.0)}$$

Em que:

$E(VPL)$: Média dos valores de VPL encontrados;

$\sigma(VPL)$: Desvio padrão dos valores de VPL encontrados;

$P(VPL < 0)$: Probabilidade de o investimento ser inviável.

3.8.3 ANÁLISE DE SENSIBILIDADE

Propõe-se a análise de sensibilidade para o modelo de digestor de larga escala considerado mais vantajoso. O método consiste em variar um ou mais fatores que influenciam o fluxo de caixa de um projeto, mantendo os demais em seu nível de referência e então calcular o efeito na variável de decisão. Quando uma pequena variação em um parâmetro altera drasticamente a rentabilidade de um projeto, diz-se que ele é muito sensível a este parâmetro. Desta forma podemos determinar quais fatores são mais sensíveis (maior efeito) e, portanto, merecem maior atenção (TÔRRES, 2006).

Deve-se escolher um método determinístico, como VLP ou TIR, como medida de comparação, que por sua vez, será afetada se determinado parâmetro variar ao longo de um intervalo definido de valores. O procedimento utilizado para concretização da análise de sensibilidade foi descrito por Blank e Tarquin (2008) de acordo com a Tabela 14.

Tabela 14 – Procedimentos para realização da análise de sensibilidade.

Etapa	Procedimentos
1 ^a	Determinar qual parâmetro de interesse poderia variar a partir do valor estimado mais provável (Ex.: vida útil, taxas, custos);
2 ^a	Selecionar o intervalo provável que incremente a variação correspondente a cada um dos parâmetros;
3 ^a	Escolher a medida do valor (Ex.: VPL, TIR, Payback, TMA);
4 ^a	Calcular os resultados para cada parâmetro, utilizando a medida do valor como base de cálculo;
5 ^a	Apresentar um gráfico do parâmetro em relação à medida do valor a fim de melhor interpretar a sensibilidade.

4. RESULTADOS

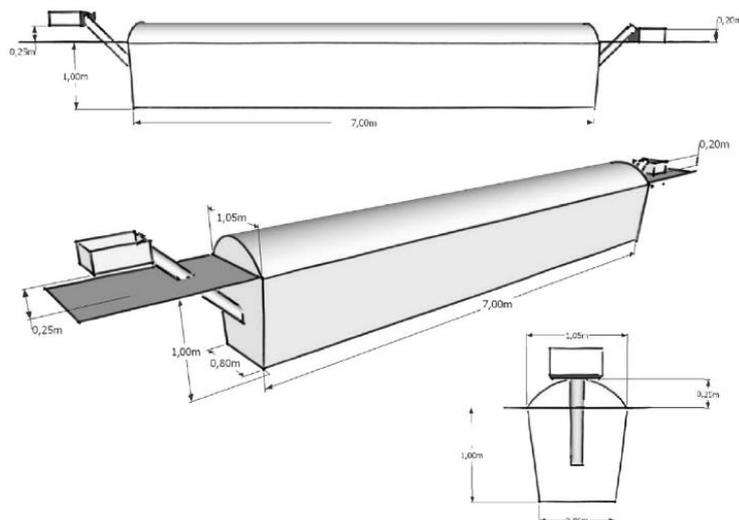
4.1 TIPO DE DIGESTORES

A literatura traz alguns modelos de digestor passíveis de serem utilizados, tanto para pequena quanto para larga escala, encontrados através da revisão bibliográfica sistemática. A seguir, são apresentados os modelos de digestores, bem como suas descrições entre outros aspectos relevantes.

4.1.1 TUBULAR

O digestor Tubular (Figura 5), também conhecido como bolsa flexível, foi construído por Botero e Preston (1987) como uma alternativa mais econômica para produção de biogás. Alguns países da América Latina, como México, Nicarágua, Colômbia, Costa Rica, Peru e Bolívia, são locais onde esse tipo de tecnologia está sendo implementada (MARTÍ-HERRERO *et al.*, 2014). Em comparação com outros digestores, em termos de materiais e mão de obra, este pode chegar a custar metade do que se gasta para implementar outros modelos. Segundo Herrero (2007) o transporte do material necessário para digestores tubulares é mais fácil e mais barato, já que podem ser carregados usando apenas um burro, além disso, são uma tecnologia com grande potencial para transferência de conhecimento de agricultor para agricultor. Na maioria das vezes o corpo do digestor é construído com geomembrana de polietileno de alta densidade (PEAD). Nesse modelo aplica-se uma inclinação de aproximadamente 3% para que o potencial gravitacional do líquido digestado seja utilizado para manter o fluxo dentro do digestor.

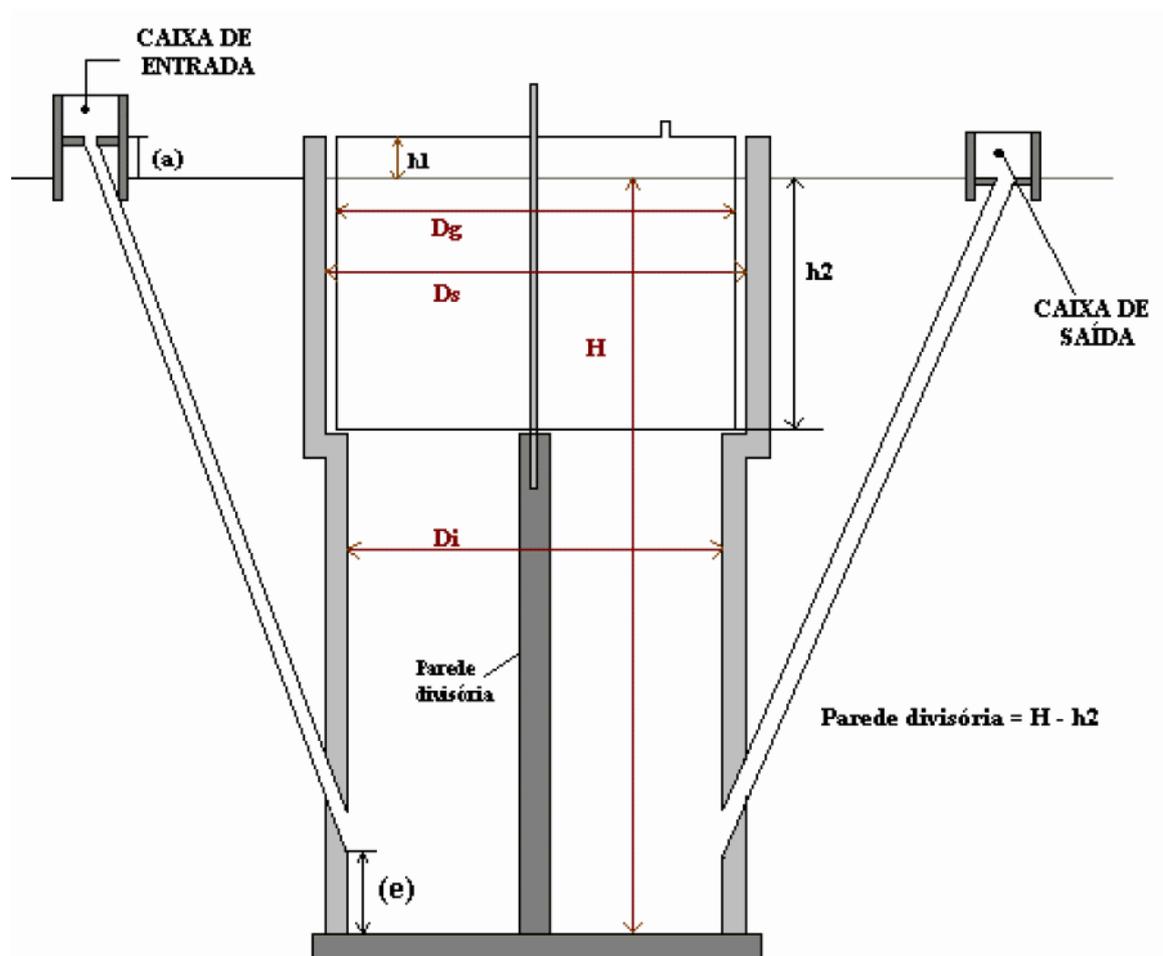
Figura 5 – Biodigestor Modelo Tubular. Fonte: MARTÍ-HERRERO *et al.*, (2014).



4.1.2 INDIANO

O digestor modelo indiano (Figura 6) oferece aos criadores, que possuem grande quantidade de bovinos, a oportunidade de capitalizar e melhorar a subsistência dos membros mais pobres da sociedade. Segundo York *et al.* (2016) o governo indiano tem um histórico de quase 30 anos investindo e dando suporte para instalação deste tipo de digestor e estima-se que até 2022 o número de digestores ativos na Índia pode ultrapassar a casa dos 6,5 milhões. Trata-se de um digestor construído em blocos de concreto, empilhados em formato circular sobre uma base de concreto magro. Os tubos que ligam a cavidade central às caixas de entrada e saída podem ser feitos de concreto ou aço galvanizado. A cúpula fabricada em ferro se movimenta dependendo da quantidade de gás no interior do digestor. Dentro da câmara principal uma parede divisória é feita em bloco de concreto ou cerâmica, para gerar um fluxo ascendente de matéria orgânica no lado de entrada e descendente no lado de saída (YORK *et al.*, 2016).

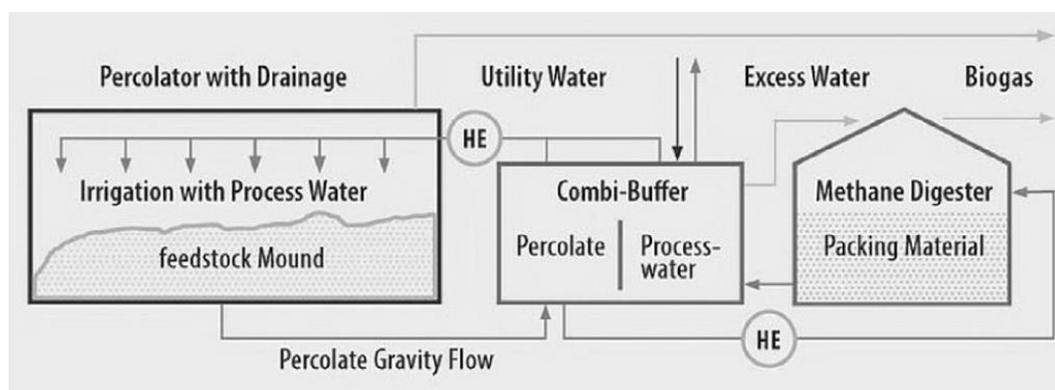
Figura 6 – Biodigestor Modelo Indiano. Fonte: Adaptado de DEGANUTTI *et al.*, (2002).



4.1.3 BATELADA OU DIGESTOR A SECO

O digestor modelo batelada (Figura 7) é um novo tipo de sistema, que consiste em uma série de containers aonde matéria orgânica sólida pode ser acumulada para produção de biogás, muito utilizado para redução do volume da parte orgânica dos resíduos sólidos urbanos presentes em lixões e aterros sanitários (QIAN *et al.*, 2016), também denominado biodigestor a seco. Segundo Benbelkacem *et al.* (2010) dentro dos containers um líquido percolado, resultado da umidade relativa dos materiais orgânicos, escorre por gravidade até um novo recipiente fechado, onde o líquido é bombeado de volta ao container principal e aspergido sobre a mesma matéria orgânica, a fim de criar um fluxo contínuo para produção de biogás. Tanto o tanque com percolado, quando o container, produzem biogás ao longo do tempo. Depois de uma semana o conteúdo do primeiro container é transferido para um segundo e novo carregamento de material orgânico é depositado no primeiro misturado com um terço do volume do material digerido. O número de containers utilizados tem relação direta com a quantidade de matéria orgânica disponível para produção.

Figura 7 – Biodigestor Modelo Batelada. Fonte: QIAN *et al.*, (2016).



4.1.4 SERTANEJO

O modelo de biodigestor Sertanejo (Figura 8), é uma adaptação do biodigestor modelo Indiano feita com uma releitura de materiais e métodos construtivos apresentado em formato de manual de construção e operação por Mattos e Faria Júnior (2011). Esse digestor se difere do indiano por não ter uma cúpula feita de ferro, em substituição utiliza-se uma caixa d'água de 3 mil litros adaptada para receber os tubos e conexões. Essa simples modificação resulta em um menor investimento inicial para execução do digestor. Outro fator que merece ser destacado sobre esse tipo de digestor é que o seu manual traz de forma simples e bem estruturada, com etapas construtivas, know-how e resumo de materiais, como se proceder sua construção.

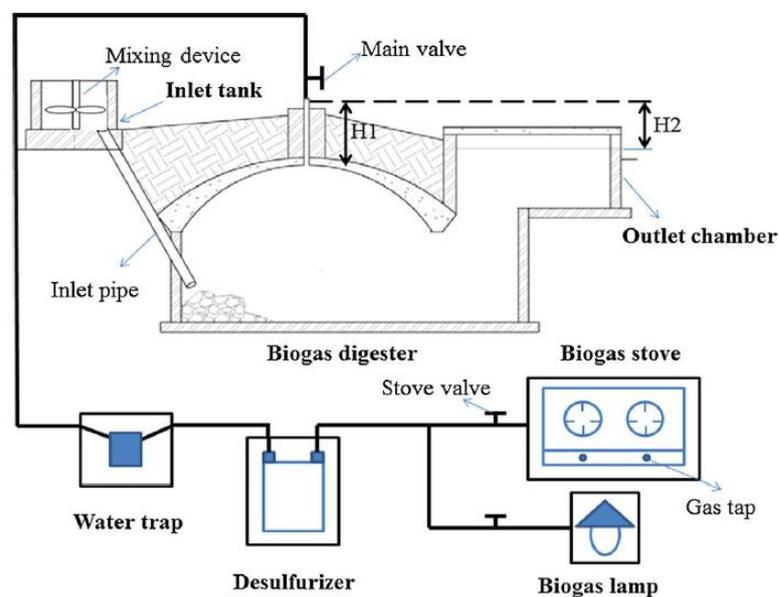
Figura 8 – Biodigestor Modelo Sertanejo. Fonte: MATTOS e FARIA JÚNIOR (2011).



4.1.5 CHINÊS

O modelo de digestor Chinês (Figura 9) é bastante difundido nas províncias chinesas e em diversos países da África (WAMWEA, 2017). O que difere esse tipo de digestor dos demais é a sua cúpula, que é feita de concreto e fixada juntamente com as paredes do digestor, portanto não movimenta durante a produção de gás. O argumento para esse tipo de construção baseia-se na diminuição da variabilidade da temperatura externa do ambiente, uma vez que o digestor dotado de cúpula de concreto pode ficar completamente enterrado sob o nível natural do terreno, o que pode ser muito vantajoso principalmente em países com temperatura média anual muito baixa (SCARLAT *et al.*, 2018).

Figura 9 – Biodigestor Modelo Chinês. Fonte: WAMWEA (2017).



4.1.6 CSTR

O modelo de digestor CSTR (Figura 10) (Continuous-flow Stirred Tank Reactor), também conhecido como RPA (Reator Perfeitamente Agitado), é amplamente utilizado no meio industrial e é uma tecnologia para digestão anaeróbica de alta performance. Esse modelo tem a vantagem de conseguir trabalhar com as mais variadas biomassas sólidas, pastosas e líquidas e possuir manutenção simples e racionalizada, para minimizar paradas na produção e do biodigestor (SEBIGAS, 2019). O biodigestor CSTR é baseado num fluxo semi-contínuo de entrada de biomassa fresca misturada de forma contínua e otimizada nos digestores, que trabalham em temperatura controlada, gerando uma alta produção de biogás. O biogás pode ser usado para produzir energia elétrica e/ou purificado, gerando biometano. O digestado de saída pode ser espalhado nos campos como fertilizante, ou separado em fração sólida e líquida, além de enriquecido e comercializado como composto organomineral.

Existem algumas empresas no mercado dedicadas a execução de projetos de implantação e fornecimento de serviços para modelos de digestor CSTR, fornecendo o suporte a decisão de investimento, o desenvolvimento da solução proposta, a implementação e o suporte à operação. A expertise dessas empresas atrai a atenção dos grandes investidores, que acabam preferindo alternativas de investimento como essas, devido a existência de um know-how por parte das empresas, bem como uma consultoria contínua, trazendo uma maior confiabilidade.

Segundo do Amaral *et al.* (2016) o desenvolvimento de biodigestores do tipo CSTR combina inúmeras vantagens em relação aos processos convencionais, principalmente no que diz respeito a suportar elevadas cargas orgânicas volumétricas (COV) possibilitando a sua utilização para uma grande variedade de águas residuais, evidenciando sua versatilidade.

Figura 10 – Biodigestor Modelo CSTR. Disponível em: <<https://www.portaldobiogas.com/>>. Acesso: 05 set 19.



4.2 DADOS COLETADOS

4.2.1 DIGESTORES DE PEQUENA ESCALA

Os parâmetros encontrados para cada modelo de digestor de pequena escala estão expostos na Tabela 15.

Tabela 15 – Parâmetros encontrados para cada tipo de digestor de pequena escala.

Tipo de Digestor	Unidade	Tubular	Indiano	Batelada	Sertanejo	Chinês
Investimento Inicial	-	263,11 US\$	68.000,00 INR	2.810,5 EUR	1.742,50 R\$	571,5 US\$
Produtividade Média	m ³ /dia	0,75	0,58	0,07	0,55	1,19
Demanda de Biomassa Seca	kg/dia	20	14,16	35	13,3	20
Demanda de Água	L/dia	60	22,62	0	21,7	20
Vida Útil	ano	10	10	15	20	20
Volume	m ³	11,3	4	21	6,66	6
Tipo de Biomassa	-	Estrume Fresco	Estrume Fresco	RSU ²	Estrume Fresco	Estrume Fresco

²RSU: Resíduos Sólidos Urbanos.

Sabendo disso, percebe-se que o digestor modelo Batelada não atende a necessidade de produção diária de biogás definida no item 3.8, o que justifica a exclusão desse modelo para o referido uso. Isso acontece porque a produtividade de biogás por parte da fração orgânica dos resíduos sólidos urbanos é pequena quando comparada com a biomassa convencional de digestores anaeróbios (estrume de animais), o que muitas vezes inviabiliza o investimento neste tipo de tecnologia. Portanto, é mais recomendável a utilização do digestor em Batelada para grandes quantidades de matéria orgânica, como as de aterros sanitários ou lixões (QIAN, 2016).

A Tabela 16 mostra o novo valor de investimento inicial convertido para Real (R\$) e atualizado mês a mês pela inflação.

Tabela 16 – Conversão monetária e correção inflacionária para os digestores de pequena escala.

Tipo de Digestor	Unidade	Tubular	Indiano	Sertanejo	Chinês
Tipo de Moeda ¹	-	US\$	INR	R\$	US\$
Investimento Inicial	\$	263,11	68.000,00	1.742,50	571,50
Ano de Publicação	ano	2014	2016	2011	2017
Taxa de Câmbio	R\$/US\$	2,3605	0,0519	1,0000	3,1853
Investimento Inicial Corrigido	R\$	621,06	3.532,17	1.742,50	1.820,41
Correção Inflacionária	R\$	830,78	4.012,11	2.782,70	1.945,43

*Moeda citada na referência encontrada: Dólar Americano (US\$), Rúpia Indiana (INR) ou Real (R\$);

4.2.2 DIGESTORES DE LARGA ESCALA

Os parâmetros encontrados para cada modelo de digestor de larga escala estão expostos na Tabela 17.

Tabela 17 – Parâmetros encontrados para cada tipo de digestor em escala industrial.

Tipo de Digestor	Unidade	Tubular	Batelada	CSTR
Investimento Inicial ¹	R\$	87.166,07	3.489.906,98	2.142.709,92
Produtividade Média	m ³ /dia	197,05	3750,00	700,00
Demanda de Biomassa Seca	kg/dia	100,21	150000	3900,00
Demanda de Água	L/dia	300,64	0	22500,00
Vida Útil	anos	10	10	10
Volume	m ³	496	4000	1000
Produção de Eletricidade	kWh/mês	1334,63	54750,00	21870,00
Tipo de Biomassa	-	Estrume Fresco	RSU ²	Diversas

¹Valores convertidos para real (R\$) e atualizados pela inflação mês a mês, desde a data de publicação da referência até outubro de 2018;

²RSU: Resíduos Sólidos Urbanos.

4.3 ANÁLISE DA VIABILIDADE ECONÔMICA

4.3.1 DIGESTORES DE PEQUENA ESCALA

Na Tabela 18 encontram-se os valores obtidos necessários para análise de viabilidade econômica, aplicando as equações do item 3.5 para os modelos de digestores de pequena escala, e excluindo o modelo Batelada devido a justificativa apresentada no item 4.2.1.

Tabela 18 – Cálculo da viabilidade econômica para cada tipo de digestor.

Tipo de Digestor	Unidade	Tubular	Indiano	Sertanejo	Chinês
Investimento Inicial	R\$	830,78	4.012,11	2.782,70	1.945,43
Custo Anual de Manutenção	R\$	83,08	401,21	278,27	194,54
Custo Mensal de Manutenção	R\$	6,92	33,43	23,19	16,21
Receita Mensal	R\$	95,45	73,82	70,00	151,45
Total Mensal	R\$	88,53	40,38	46,81	135,24
Períodos	mês	120	120	240	240
Valor Presente Líquido	R\$	5.666,68	-1.048,27	1.832,71	11.389,10
VPL Horizontes Iguais	R\$	7.612,84	-1.408,28	1.832,71	11.389,10
Payback	anos	0,8	8,3	5,0	1,2

Os valores de VPL e VPL Horizontes Iguais da Tabela 18 mostram que os modelos Tubular, Sertanejo e Chinês são considerados investimentos economicamente viáveis, já que para todos eles o valor do VPL e do VPL Horizontes Iguais é maior do que zero. Pelo mesmo motivo o digestor modelo indiano é inviável economicamente. O maior VPL é do modelo Chinês, o menor Payback é do modelo Tubular e o menor investimento inicial é o do modelo Tubular.

4.3.2 DIGESTORES DE LARGA ESCALA

No primeiro cenário 100% (cem por cento) do investimento inicial é adquirido através de empréstimo, portanto considerando o pagamento de juros sobre o valor financiado. A Tabela 19 mostra o resultado obtido utilizando-se as equações (7.0) e (8.0) para cada modelo de digestor de larga escala.

Tabela 19 – Cálculo do fluxo de caixa para cada tipo de digestor de larga escala para o cenário 1.

Tipo de Digestor	Unidade	Tubular	Batelada	CSTR
Custo Anual de Manutenção	R\$	21.791,52	872.476,75	535.677,48
Custo Mensal de Manutenção	R\$	1.815,96	72.706,40	44.639,79
Parcela Mensal ¹	R\$	820,60	37.643,43	23.112,06
Biofertilizante	R\$	2.282,36	85.405,50	88.821,72
Energia	R\$	556,22	22.817,61	9.114,54
Créditos de Carbono	R\$	703,36	13.357,76	2.493,45
Receita Mensal	R\$	3.541,94	121.580,87	100.429,71
Fluxo de Caixa Total Mensal	R\$	905,38	11.231,04	32.677,86

¹Parcela mensal paga em função do empréstimo realizado.

A Tabela 20 mostra os dados obtidos com o cálculo da viabilidade econômica para cada modelo de digestor de larga escala para o cenário considerando o empréstimo em uma das linhas de crédito do Pronaf.

Tabela 20 – Cálculo da viabilidade econômica para cada modelo de digestor de larga escala para o cenário 1.

Tipo de Digestor	Unidade	Tubular	Batelada	CSTR
Investimento Inicial	R\$	87.166,07	3.489.906,98	2.142.709,92
Fluxo de Caixa Mensal	R\$	905,38	11.231,04	32.677,86
Períodos*	mês	120	120	120
Linha de Crédito ¹	-	Eco	Agroindústria	Agroindústria
Rendimento (ao ano) ²	% a.a.	7,10%	6,20%	6,20%
Rendimento (ao mês)	% a.m.	0,5732%	0,5025%	0,5025%
Valor Presente Líquido	R\$	(8.768,33)	(2.479.681,75)	796.641,62
TIR	% a.m.	0,39%	(1,39%)	1,15%
Payback	anos	8,0	25,9	5,5

¹Linha de crédito compatível com o vulto financeiro do investimento inicial conforme tabela 11;

²Rendimento médio anual esperado para cada linha de crédito;

³Números em parênteses representam valores negativos.

A Tabela 21 compara a TIR calculada para cada tipo de digestor com a TMA relativa a cada linha de crédito em que o vulto financeiro do projeto se enquadra, para o cenário 1.

Tabela 21 – Comparação entre TIR e TMA para o cenário 1.

Tipo de Digestor	Unidade	Tubular	Batelada	CSTR
TIR (ao mês)	% a.m.	0,39%	-1,39%	1,15%
TIR (ao ano)	% a.a.	4,73%	-15,51%	14,74%
Linha de Crédito	-	Eco	Agroindústria	Agroindústria
TMA	% a.a.	7,10%	6,20%	6,20%
TIR (ao ano) > TMA	-	Não	Não	Sim

Os valores de VPL (Tabela 20) e a comparação entre TIR e TMA (Tabela 21) mostram que apenas o modelo CSTR é considerado como um investimento economicamente viável, já que apenas para ele o valor do VPL é maior do que zero e o valor da TIR é maior do que a TMA. Pelo mesmo motivo os digestores Tubular e Batelada são inviáveis economicamente. O maior VPL é do modelo CSTR, a maior TIR é do modelo CSTR, o menor Payback é do modelo CSTR e o menor investimento inicial é o do modelo Tubular.

No segundo cenário considera-se que o investidor dispõe de todo o dinheiro necessário para o investimento inicial, portanto desconsiderando o pagamento de juros. A Tabela 22 mostra o resultado obtido utilizando-se as equações (7.0) e (8.0) para cada modelo de digestor de larga escala.

Tabela 22 – Cálculo do fluxo de caixa para cada tipo de digestor de larga escala para o cenário 2.

Tipo de Digestor	Unidade	Tubular	Batelada	CSTR
Custo Anual de Manutenção	R\$	21.791,52	872.476,75	535.677,48
Custo Mensal de Manutenção	R\$	1.815,96	72.706,40	44.639,79
Biofertilizante	R\$	2.282,36	85.405,50	88.821,72
Energia	R\$	556,22	22.817,61	9.114,54
Créditos de Carbono	R\$	703,36	13.357,76	2.493,45
Receita Mensal	R\$	3.541,94	121.580,87	100.429,71
Fluxo de Caixa Total Mensal	R\$	1.725,98	48.874,47	55.789,92

O novo fluxo de caixa aliviado leva às modificações observadas na Tabela 23.

Tabela 23 – Cálculo da viabilidade econômica para cada modelo de digestor de larga escala para o cenário 2.

Tipo de Digestor	Unidade	Tubular	Batelada	CSTR
Investimento Inicial	R\$	87.166,07	3.489.906,98	2.142.709,92
Fluxo de Caixa Mensal	R\$	1.725,98	48.874,47	55.789,92
Períodos	mêses	120	120	120
Linha de Crédito ¹	-	Eco	Agroindústria	Agroindústria
Rendimento (ao ano) ²	% a.a.	9,60%	11,70%	11,70%
Rendimento (ao mês)	% a.m.	0,767%	0,926%	0,926%
Valor Presente Líquido	R\$	47.917,91	41.321,46	1.888.166,24
TIR	% a.m.	1,77%	0,97%	2,54%
Payback	anos	4,2	6,0	3,2

¹Linha de crédito compatível com o vulto financeiro do investimento inicial conforme tabela 11;

²Rendimento médio anual esperado para cada linha de crédito desconsiderando o pagamento de juros.

A Tabela 24 compara a TIR calculada para cada tipo de digestor com a TMA relativa a cada linha de crédito em que o vulto financeiro do projeto se enquadra, para o cenário 2.

Tabela 24 – Comparação entre TIR e TMA para o cenário 2.

Tipo de Digestor	Unidade	Tubular	Batelada	CSTR
TIR (ao mês)	% a.m.	1,77%	0,97%	2,54%
TIR (ao ano)	% a.a.	23,43%	12,28%	35,09%
TMA	% a.a.	9,60%	11,70%	11,70%
TIR (ao ano) > TMA	-	Sim	Sim	Sim

Os valores de VPL (Tabela 23) e a comparação entre TIR e TMA (Tabela 24) mostram que os modelos Tubular, Batelada e CSTR são considerados como um investimento economicamente viável, já que para todos o valor do VPL é maior do que zero e o valor da TIR é maior do que a TMA. O maior VPL é do modelo CSTR, a maior TIR é do modelo CSTR, o menor Payback é do modelo CSTR e o menor investimento inicial é o do modelo Tubular.

4.4 TOMADA DE DECISÃO

4.4.1 DIGESTORES DE PEQUENA ESCALA

Se levarmos em conta apenas o aspecto econômico, a escolha seria o modelo Chinês, porém, o perfil socioeconômico do investidor alvo tem enorme peso na escolha do digestor de pequena escala mais vantajoso. As famílias que vivem em áreas rurais muitas vezes possuem uma baixa renda familiar e baixo nível de escolaridade (QU *et al.*, 2013), portanto nem sempre essas famílias podem arcar com os elevados custos de investimento inicial. Ademais, quanto maior a dificuldade de construção, operação e manutenção de um determinado tipo de digestor, maior a chance de insucesso da implantação do investimento.

Tabela 25 – Parâmetros operacionais dos diferentes tipos de digestor.

Tipo de Digestor	Unidade	Tubular	Indiano	Sertanejo	Chinês
Complexidade de Construção	Pequena	Média	Pequena	Média	Média
Complexidade de Operação	Pequena	Pequena	Média	Alta	Alta

O modelo Sertanejo pode ser retirado da análise, sob a justificativa de ser o menor VPL dos 3 modelos economicamente viáveis (Tubular, Sertanejo e Chinês) e possuir o maior investimento inicial. Com isso a escolha restringe-se a duas alternativas: modelo Tubular e modelo Chinês. Uma escolha conservadora, ou seja, buscando o menor risco, leva em conta a maior probabilidade de insucesso, que acontece quando existe maior complexidade de construção e operação do modelo.

Portanto, baseando-se em uma escolha conservadora, buscando o menor índice de insucesso, aliado a viabilidade econômica e o perfil socioeconômico do investidor alvo, conclui-se que o modelo mais vantajoso é o Tubular.

4.4.2 DIGESTORES DE LARGA ESCALA

No cenário considerando o pagamento mensal de juros destaca-se a rentabilidade do investimento no modelo de CSTR, que apresenta maior VPL (R\$ 796.641,62), menor payback (5,5 anos) e maior TIR (14,74%), que neste caso é o investimento mais vantajoso dentre os três digestores de larga escala apresentados, já que os outros dois não são considerados viáveis economicamente.

Já no cenário desconsiderando o pagamento mensal de juros todos os modelos são considerados viáveis economicamente, porém a rentabilidade do investimento no modelo de CSTR, que apresenta maior VPL (R\$ 1.888.166,24), menor payback (3,2 anos) e maior TIR (35,09%), que de modo geral é o investimento mais vantajoso dentre os três apresentados. Percebe-se que o vulto financeiro do investimento inicial para os biodigestores tipo Batelada e CSTR em muito se diferem do investimento inicial para o Modelo Tubular, embora todos sejam considerados digestores de larga escala. Portanto, do ponto de vista do investidor, há de se privilegiar o investimento no modelo que for compatível com sua disponibilidade monetária, da mesma forma que foi considerada a linha de crédito na Tabela 11, ou seja, para uma cooperativa de investidores que possuem até 35 milhões de reais é mais vantajoso investir na construção e operação de um digestor modelo CSTR, já para um investidor individual que dispõe de até 165 mil reais só será possível investir na construção e operação de um digestor modelo Tubular. Levando em consideração que o investidor dispõe de quantias ilimitadas de dinheiro, o investimento mais vantajoso é o modelo CSTR.

4.5 PRODUTO DO MESTRADO PROFISSIONAL

Como produto final deste trabalho, exigido para conclusão do curso, foram escolhidos os projetos e orçamentos referentes à implantação de um digestor Tubular de pequena escala com volume de 11,3 m³. O projeto (ANEXO I) foi elaborado com base nas especificações presentes na literatura (MARTÍ-HERRERO *et al.*, 2014; MARTÍ-HERRERO *et al.*, 2018; CERVI *et al.*, 2010) ou adaptados por ocasião para realidade de execução de obra. O orçamento estimativo (ANEXO II) e o cronograma físico-financeiro de obras (ANEXO III) foram elaborados utilizando tabelas referenciais oficiais mais recentes da Agência Goiana de Transportes e Obras Civas (AGETOP CIVIL DEZEMBRO/2018) considerando a mão de obra ne-

cessária para realização dos serviços. Também se encontra disponível a lista de materiais (ANEXO IV) para auxiliar a aquisição dos produtos para executar a obra do digestor Tubular.

4.6 ANÁLISE GRÁFICA

A Tabela 26 mostra os dados obtidos para digestores com diversas escalas construtivas e que têm maior relevância quanto à análise gráfica. Os parâmetros considerando o pagamento de juros na hipótese de aquisição de 100% de financiamento para construção da planta de biogás foram eliminados desta análise, já que esta hipótese não foi considerada na obtenção dos parâmetros relativos aos digestores de pequena escala, o que causaria uma discrepância entre os valores comparativos.

Tabela 26 – Dados utilizados na análise gráfica.

Ocorrências	Volume (m ³) ¹	Investimento Inicial (R\$) ²	VPL (R\$) ²	TIR (%) ^{2**}
Tubular 1	11,30	830,78	5.666,68	0,11927
Tubular 2	496,00	87.166,07	47.917,91	0,01770
Tubular 3	1.130,00	171.331,80	327.408,90	0,03787
Indiano 1	4,00	4.012,11	-1.048,27	0,00329
Batelada 1	21,00	11.094,59	-18.553,88	-
Batelada 2	4.000,00	3.489.906,98	41.321,46	0,00970
Sertanejo 1	6,66	2.782,70	1.832,71	-
Chinês 1	6,00	1.945,43	11.389,10	-
CSTR 1	1.000,00	2.142.709,92	1.888.166,24	0,02538

¹Coordenadas no eixo das abscissas;

²Coordenadas no eixo das ordenadas.

Coordenadas (X,Y) com distâncias normais às curvas muito acima da média, também chamados de outliers (pontos fora da curva), foram excluídas para redução do erro experimental e para não influenciar negativamente a análise gráfica. Os itens em sequência mostram as linhas de tendência que foram obtidas comparando os dados por tipo de digestor e também uma comparação global, incluindo todos os valores obtidos na Tabela 26. Os gráficos referentes somente aos modelos Indiano e Sertanejo foram suprimidos pela falta de dados suficientes para se configurar uma linha de tendência, sendo necessário no mínimo dois pontos para tal. Os parâmetros investimento inicial, VPL e TIR, foram comparados com o volume a fim de estimar sua variação de acordo com o aumento de escala dos biodigestores.

4.6.1 LINHAS DE TENDÊNCIA MODELO TUBULAR

As Figuras 11, 12 e 13 mostram as linhas de tendência variando os parâmetros investimento inicial, VPL e TIR em função do aumento da escala de um digestor modelo Tubular.

Figura 11 – Variação do investimento inicial em função do volume para um digestor modelo Tubular.

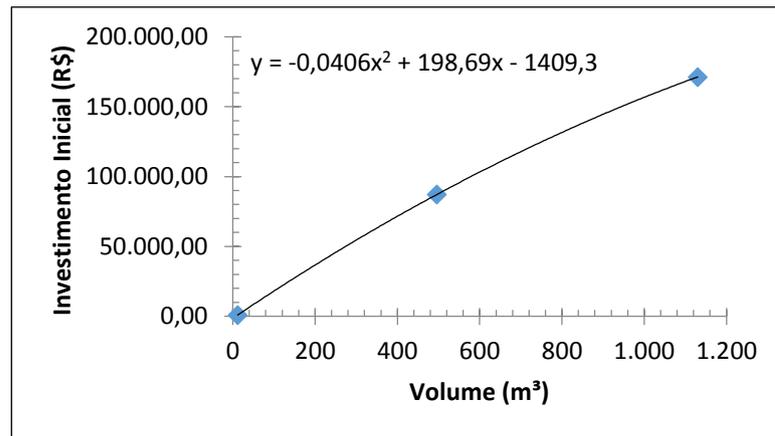


Figura 12 – Variação do valor presente líquido em função do volume para um digestor modelo Tubular.

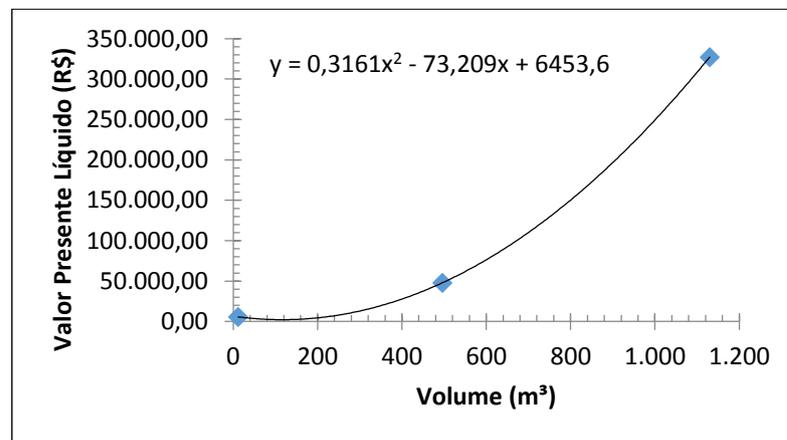
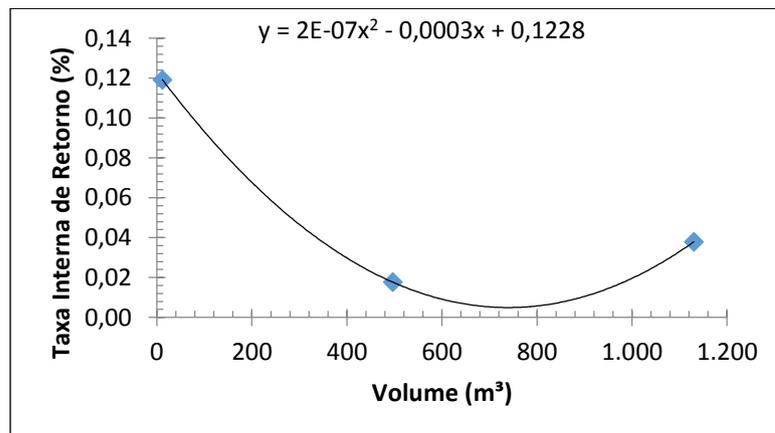


Figura 13 – Variação da taxa interna de retorno em função do volume para um digestor modelo Tubular.



Observa-se que o investimento inicial e o VPL crescem, de acordo com o esperado, conforme se aumenta o volume dos digestores, sendo suave e quase linear para o investimento inicial e crescente para o VPL. Para a TIR observa-se que ela diminui com o aumento do volume do digestor até chegar em um ponto mínimo de aproximadamente 750 m³ depois volta a crescer.

4.6.2 LINHAS DE TENDÊNCIA MODELO BATELADA

As Figuras 14 e 15 mostram as linhas de tendência variando os parâmetros investimento inicial e VPL em função do aumento da escala de um digestor modelo Batelada.

Figura 14 – Variação do investimento inicial em função do volume para um digestor modelo batelada.

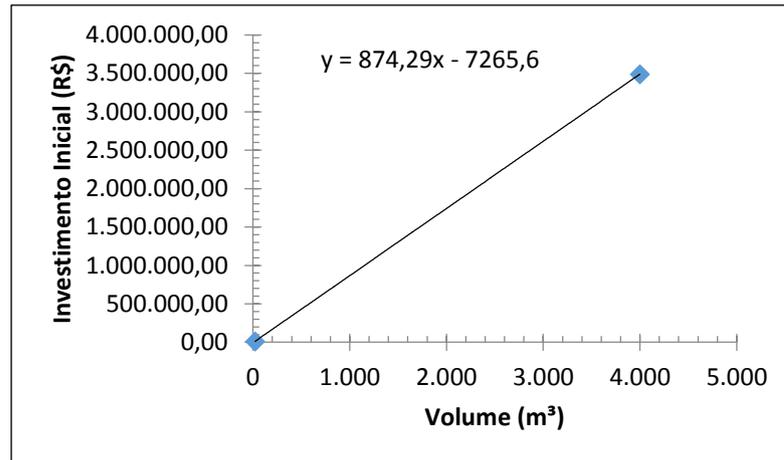
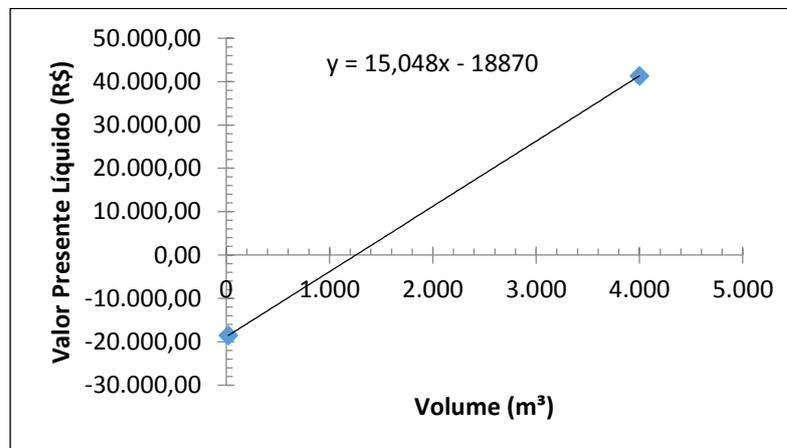


Figura 15 – Variação do valor presente líquido em função do volume para um digestor modelo batelada.



Observa-se que o investimento inicial e o VPL crescem de forma linear, de acordo com o esperado, conforme se aumenta o volume dos digestores. Para uma análise mais precisa seria necessário à adição de mais pontos, porém, o comportamento esperado com a adição de mais pontos é algo próximo ao crescimento linear observado nas Figuras 14 e 15. Pode-se dizer que o modelo Batelada só é considerado viável para volumes maiores que 1100 m³.

4.6.3 LINHAS DE TENDÊNCIA MODELO CSTR

As Figuras 16 e 17 mostram as linhas de tendência variando os parâmetros investimento inicial e VPL em função do aumento da escala de um digestor modelo CSTR.

Figura 16 – Variação do investimento inicial em função do volume para um digestor modelo CSTR.

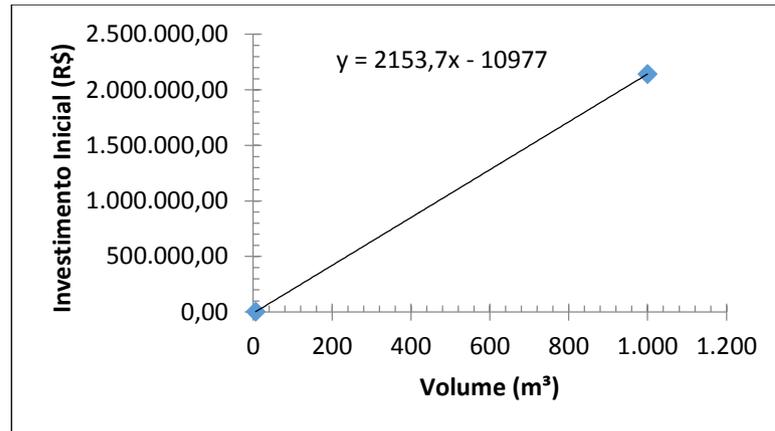
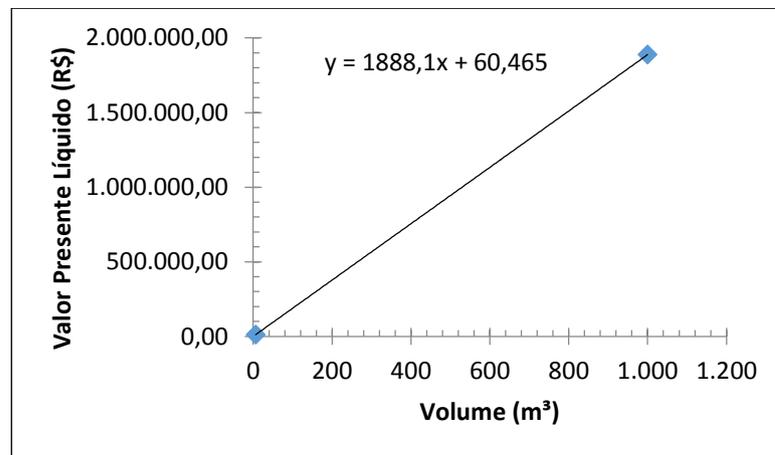


Figura 17 – Variação do valor presente líquido em função do volume para um digestor modelo CSTR.



Observa-se que o investimento inicial e o VPL crescem de forma linear, de acordo com o esperado, conforme se aumenta o volume dos digestores. Para uma análise mais precisa seria necessário à adição de mais pontos, porém, o comportamento esperado com a adição de mais pontos é algo próximo ao crescimento linear observado nas Figuras 16 e 17.

4.6.4 LINHAS DE TENDÊNCIA GERAL

As Figuras 18, 19 e 20 mostram as linhas de tendência variando os parâmetros investimento inicial, VPL e TIR em função do aumento da escala de todos digestores da Tabela 26 simultaneamente.

Figura 18 – Variação do investimento inicial em função do volume para todos modelos de digestores.

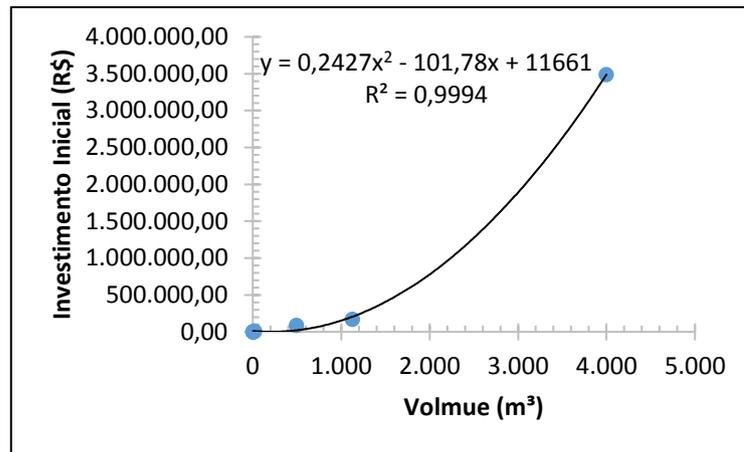


Figura 19 – Variação do valor presente líquido em função do volume para todos modelos de digestores.

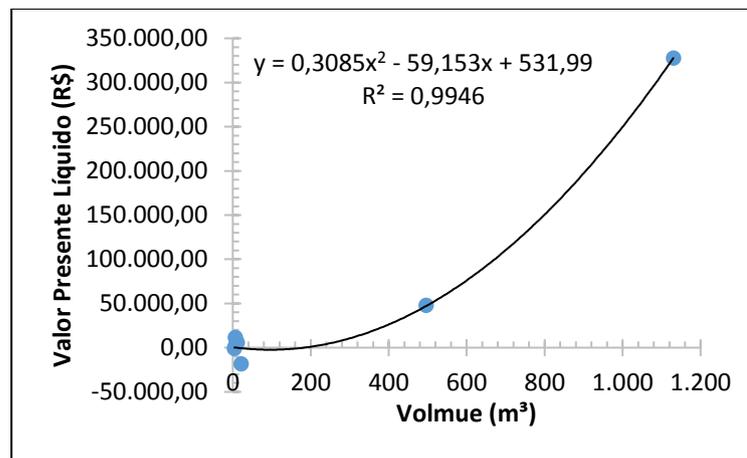
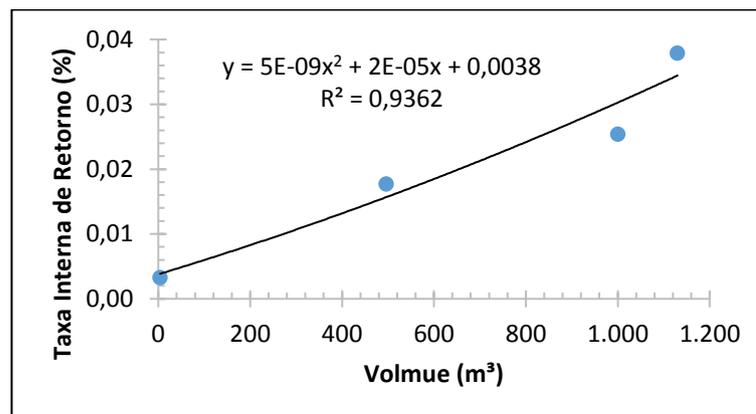


Figura 20 – Variação da taxa interna de retorno em função do volume para todos modelos de digestores.



Observa-se que o investimento inicial cresce, de acordo com o esperado, conforme se aumenta o volume dos digestores, de forma crescente. Já o VPL tem um valor inesperado de 0 até 200 m³, depois volta a aumentar de forma crescente. Para a TIR observa-se que ela aumenta conforme é ampliado o volume do digestor.

4.7 MÉTODO DE MONTE CARLO

As Tabelas 27 e 28 trazem os cenários e suas probabilidades de ocorrência baseados no desvio padrão das variáveis da Tabela 26.

Tabela 27 – Cenários probabilísticos da variação do investimento inicial, venda dos fertilizantes e venda de energia excedente.

Investimento Inicial	P (Invest.)	Fertilizante	P (Fertiliz.)	Energia	P (Energ.)
1.714.167,94	10%	62.175,20	35%	8.203,09	5%
2.142.709,92	80%	88.821,72	50%	9.114,54	85%
2.678.387,40	10%	126.888,17	15%	10.127,27	10%

Tabela 28 – Probabilidade e distribuição acumulada relacionada a cada variável.

Créditos de Carbono	P (CC.)	Manutenção	P (Manutenç.)	Tarifa Energia ¹	P (Tarif.)
1.496,07	40%	22.319,90	5%	0,02	30%
2.493,45	50%	44.639,79	60%	0,03	50%
4.155,75	10%	89.279,58	35%	0,04	20%

¹Varição média da tarifa de energia brasileira entre o período de 2013 até 2015. Disponível em: <<https://www.nexojornal.com.br/grafico/2017/10/06/A-trajet%C3%B3ria-das-tarifas-de-energia-nos-%C3%BAltimos-14-anos>>. Acesso em 10 de junho de 2019.

A Tabela 29 traz o resultado da aplicação das Equações (23.0) e (24.0).

Tabela 29 – Resultados da aplicação do Método de Monte Carlo.

E (VPL)	σ (VPL)	VPL (mín.)	VPL (máx.)	P(VPL<0)	P(VPL<Médio ¹)
581.514,74	2.172.924,14	(3.388.595,57)	6.475.029,97	39%	76%

¹VPL baseado em parâmetros médios determinados para o modelo CSTR, e igual a R\$ 2.142.709,92;

²Valores entre parênteses representam números negativos.

Vale ressaltar que a chance de insucesso determinada na Tabela 29 é de 39% (trinta e nove por cento), valor relativamente baixo e dentro do esperado, porém a chance do VPL ser menor que o médio é considerada alta (76%). A distribuição de frequências e frequências acumuladas para a simulação de Monte Carlo resulta nos números da Tabela 30, bem como no histograma.

Tabela 30 – Distribuição de frequência obtida para o a simulação.

VPL Mínimo	VPL Máximo	Frequência	Freq. Acumulada
-4.000.000	-2.000.000	502	502
-2.000.000	0	1193	1695
0	2.000.000	1670	3365
2.000.000	4.000.000	232	3597
4.000.000	6.000.000	390	3987
6.000.000	8.000.000	13	4000

Finalmente, deve-se acumular a distribuição de probabilidades do retorno, para se obter uma visão melhor do comportamento da curva, de acordo com as Figuras 21 e 22.

Figura 21 – Distribuição das probabilidades do retorno do investimento em um digestor modelo CSTR utilizando a simulação de Monte Carlo, baseado nas frequências da Tabela 30.

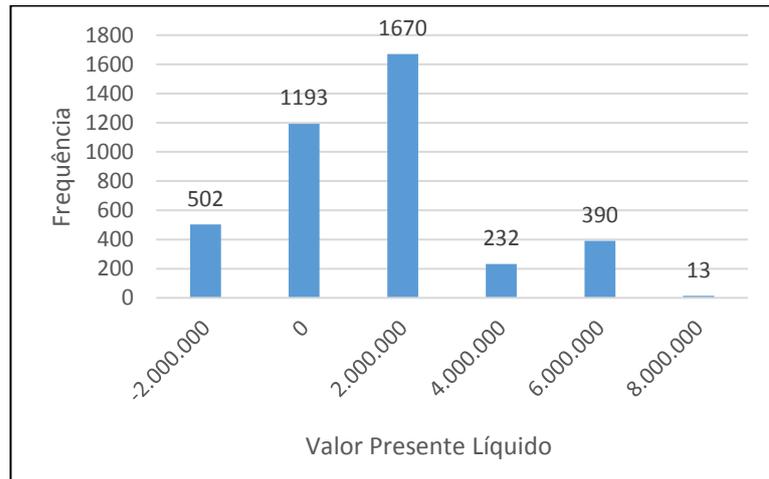
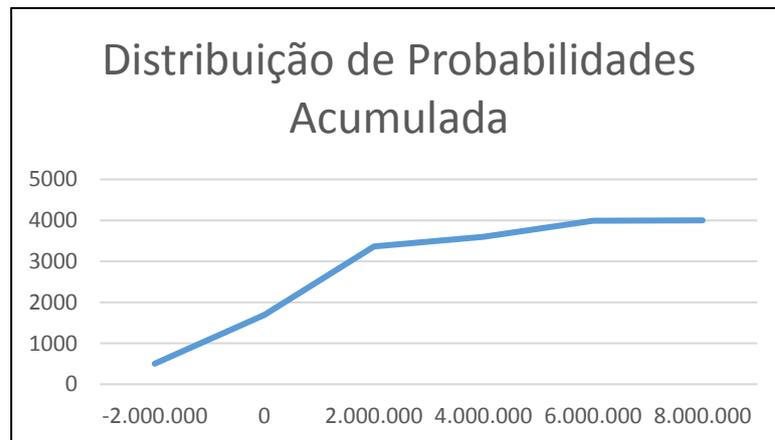


Figura 22 – Distribuição das probabilidades acumuladas do retorno do investimento em um digestor modelo CSTR utilizando a simulação de Monte Carlo, baseado nas frequências da Tabela 30.



Observa-se que a distribuição de probabilidades em muito se aproxima de uma curva normal e que concentra a maioria dos cenários abaixo do valor de R\$ 4.000.000,00. De forma geral o comportamento obtido está próximo do esperado, exceto pela anomalia próxima ao valor de VPL médio, provavelmente pelo alto índice de probabilidade de ocorrência do investimento inicial médio.

4.8 ANÁLISE DE SENSIBILIDADE

Com base nos procedimentos descritos na Tabela 14 escolheram-se os parâmetros de interesse como sendo: investimento inicial, fluxo de caixa total mensal, períodos, custo mensal de manutenção, venda de biofertilizante, comercialização de energia e venda de créditos de carbono. Os parâmetros foram comparados com as medidas de VPL e TIR e seus comportamentos foram transformados em curvas gráficas.

4.8.1 SENSIBILIDADE DO VPL

Observa-se como varia o VPL para o investimento no digestor modelo CSTR de larga escala, em função dos parâmetros escolhidos.

Figura 23 – Sensibilidade do VPL em relação ao investimento inicial.

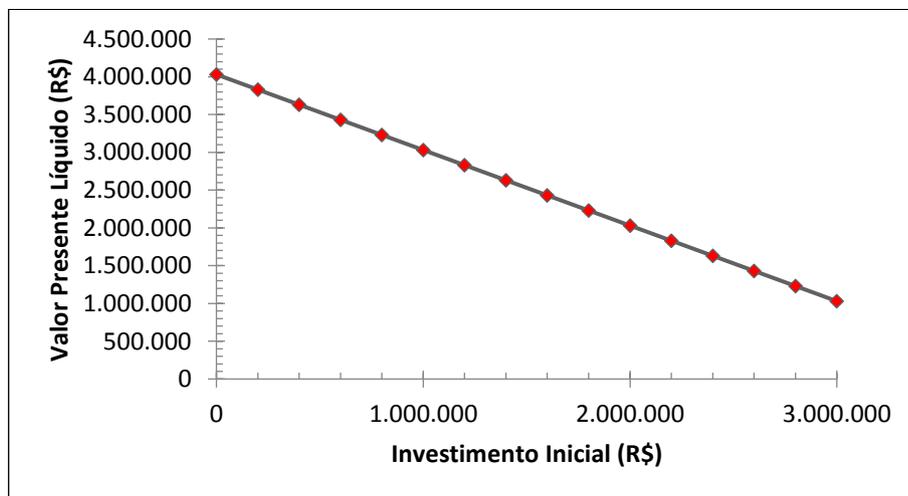


Figura 24 – Sensibilidade do VPL em relação ao fluxo de caixa total mensal.

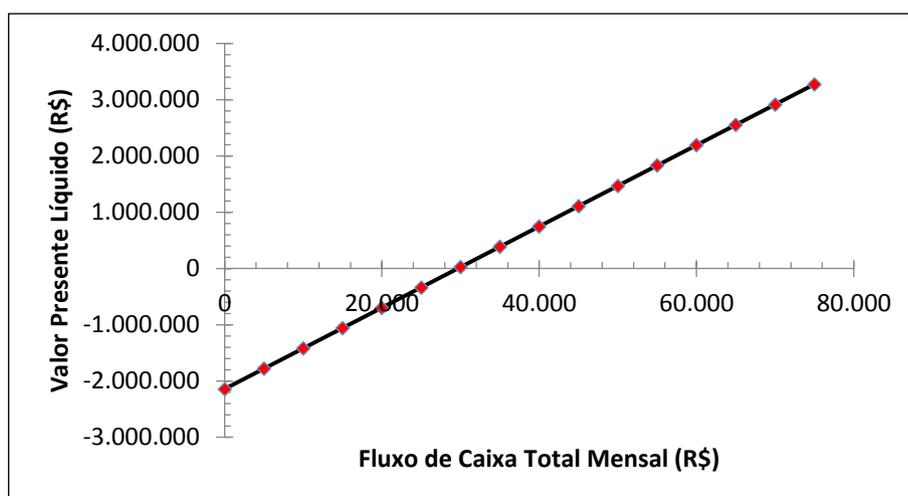


Figura 25 – Sensibilidade do VPL em relação ao número de períodos.

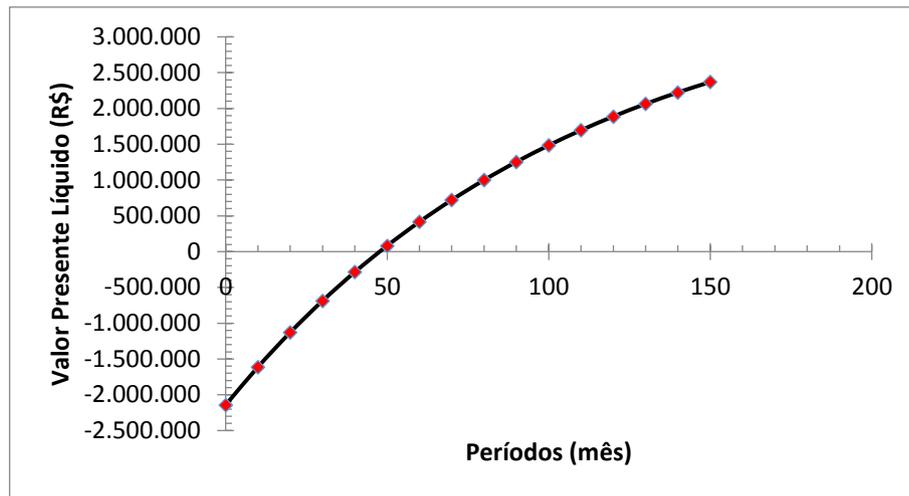


Figura 26 – Sensibilidade do VPL em relação ao custo mensal de manutenção.

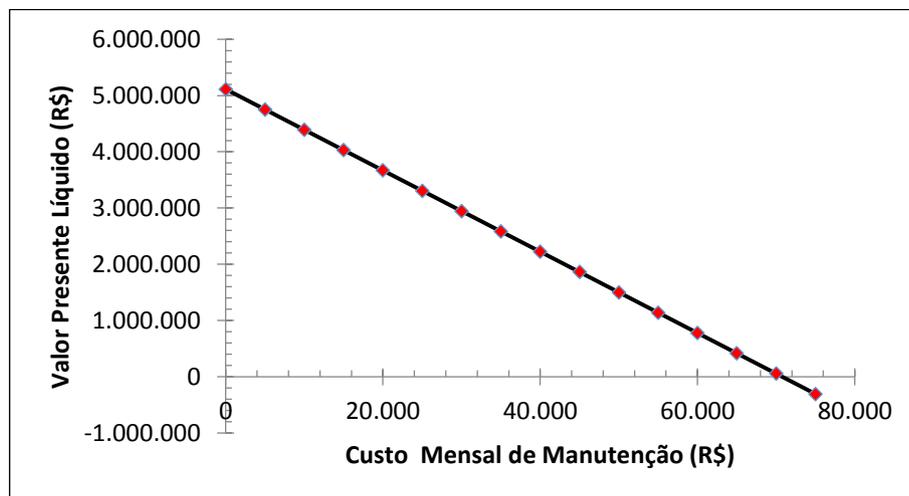


Figura 27 – Sensibilidade do VPL em relação a venda de biofertilizante.

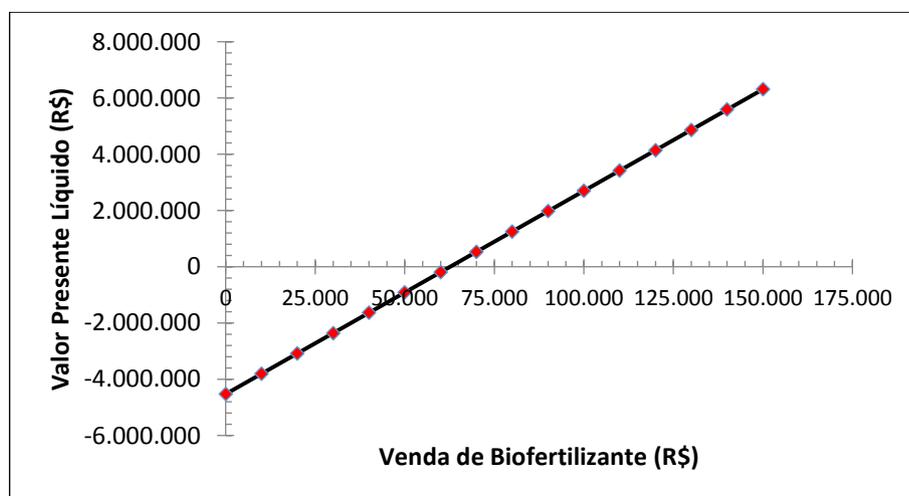
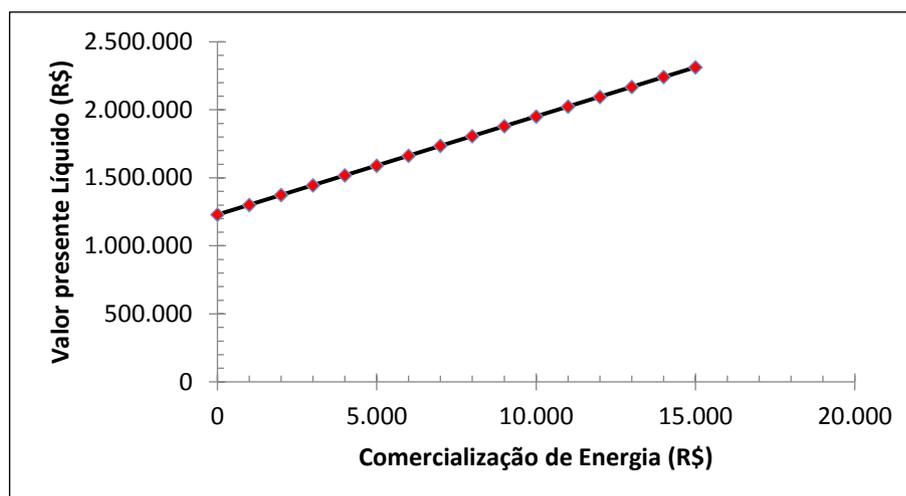
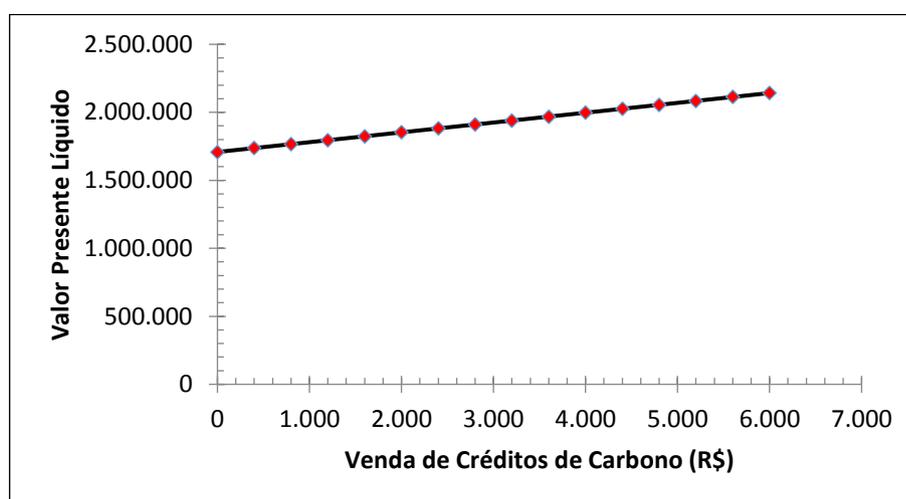


Figura 28 – Sensibilidade do VPL em relação a comercialização de energia.**Figura 29** – Sensibilidade do VPL em relação a venda de créditos de carbono.

Percebe-se que o VPL tem relação direta com o fluxo de caixa total mensal, com o número de períodos, com a venda de biofertilizantes, com a comercialização de energia e com a venda de créditos de carbono, ou seja, o aumento desses parâmetros também causa aumento no valor do VPL. Já para o investimento inicial e para o custo mensal de manutenção existe uma relação inversa com o VPL, ou seja, com a diminuição desses parâmetros acontece um aumento no valor do VPL. O parâmetro ao qual o VPL é mais sensível é a venda de biofertilizante, e o menos sensível é a venda de créditos de carbono. Significa que o parâmetro de maior impacto no VPL de digestores de larga escala é a venda de biofertilizantes.

4.8.2 SENSIBILIDADE DA TIR

De forma análoga ao item 4.8.1, observa-se como varia a TIR para o investimento no digestor modelo CSTR de larga escala, em função dos parâmetros escolhidos.

Figura 30 – Sensibilidade da TIR em relação ao investimento inicial.

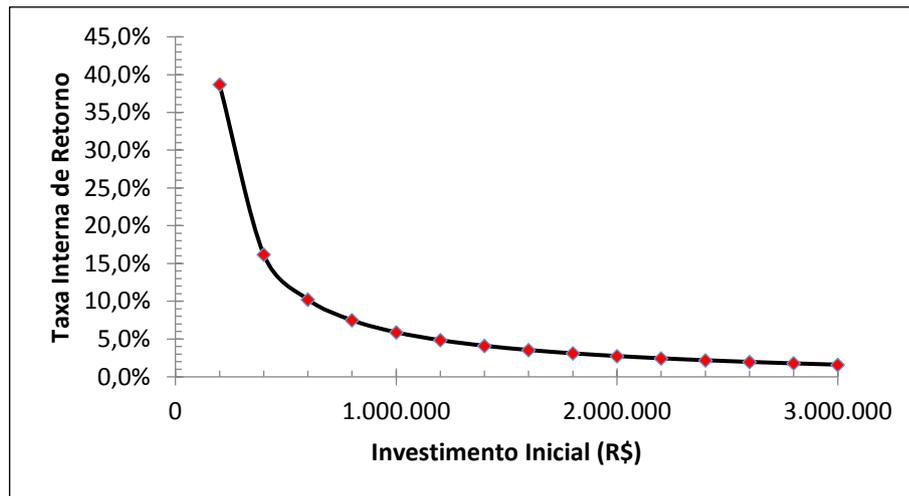


Figura 31 – Sensibilidade da TIR em relação ao fluxo de caixa total mensal.

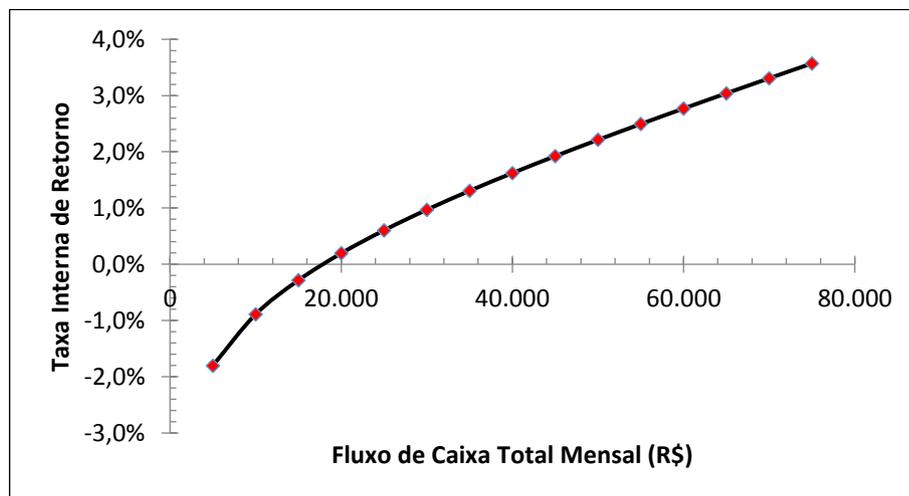


Figura 32 – Sensibilidade da TIR em relação ao número de períodos.

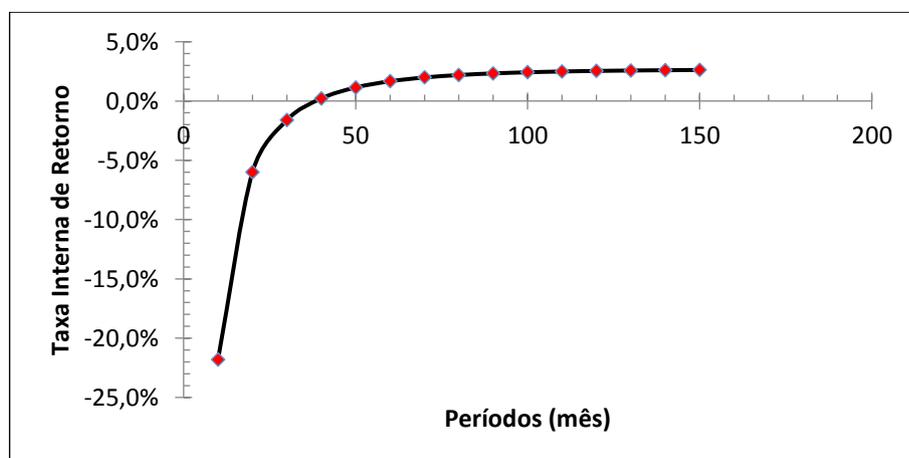


Figura 33 – Sensibilidade da TIR em relação ao custo mensal de manutenção.

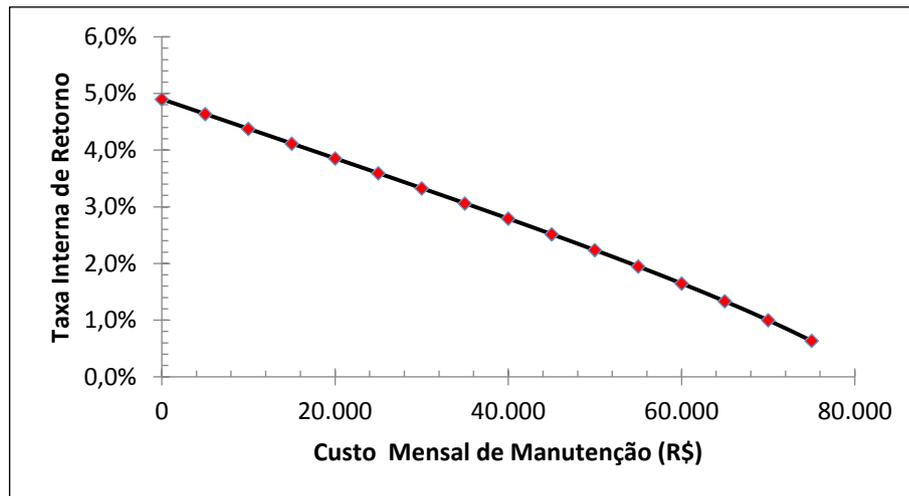


Figura 34 – Sensibilidade da TIR em relação a venda de biofertilizante.

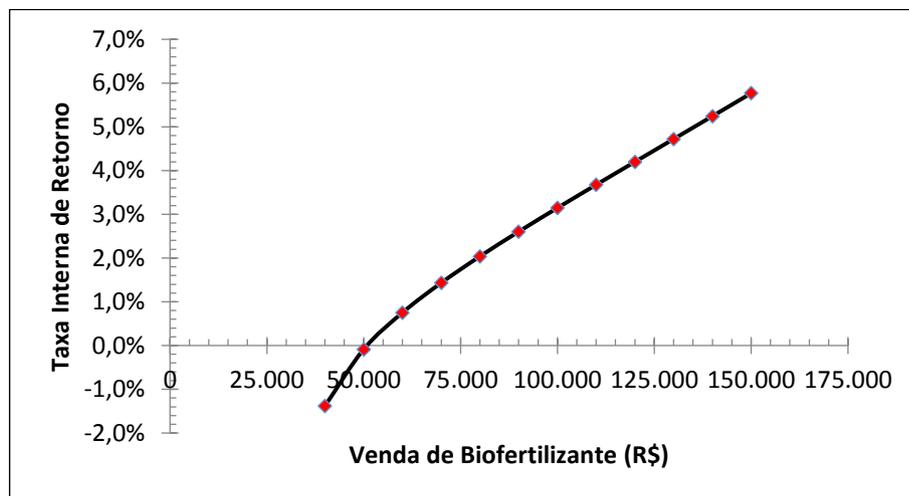


Figura 35 – Sensibilidade da TIR em relação a comercialização de energia.

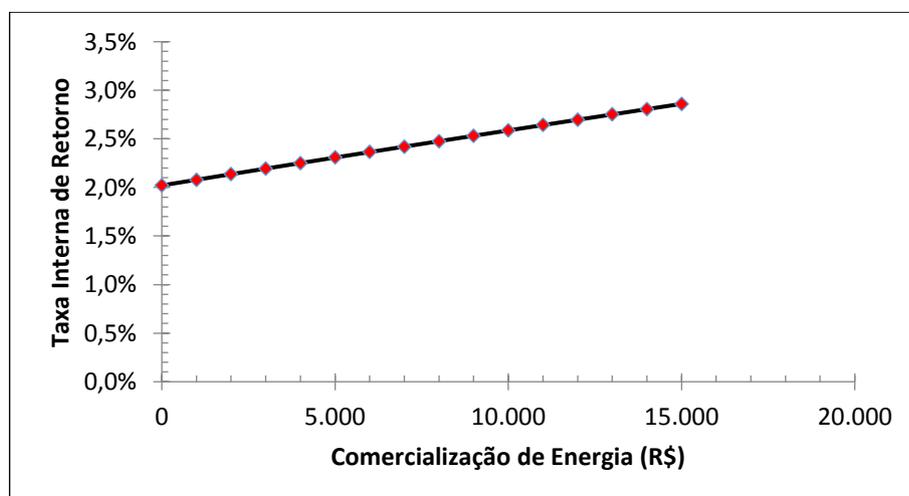
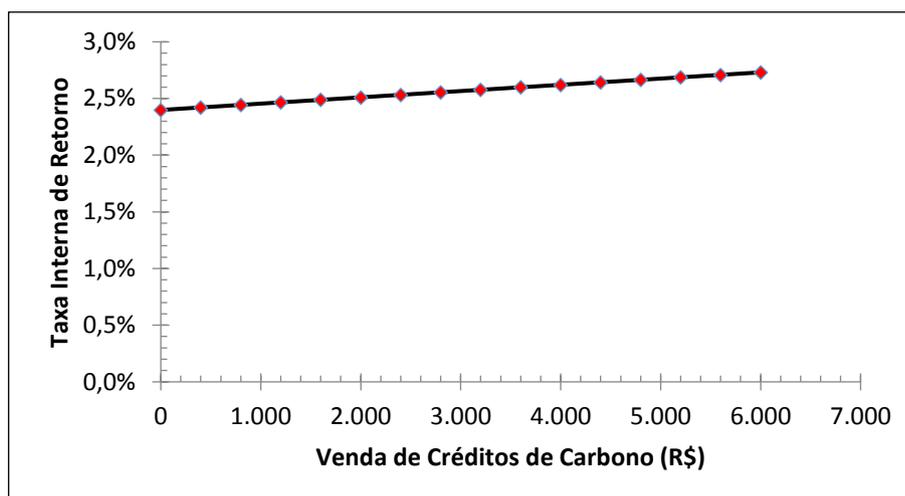


Figura 36 – Sensibilidade da TIR em relação a venda de créditos de carbono.

Percebe-se que a TIR tem relação direta com o fluxo de caixa total mensal, com o número de períodos, com a venda de biofertilizantes, com a comercialização de energia e com a venda de créditos de carbono, ou seja, o aumento desses parâmetros também causa aumento no valor da TIR. Já para o investimento inicial e para o custo mensal de manutenção existe uma relação inversa com a TIR, ou seja, com a diminuição desses parâmetros acontece um aumento no valor da TIR. O parâmetro ao qual a TIR é mais sensível é o investimento inicial, e o menos sensível é a venda de créditos de carbono. Significa que o parâmetro de maior impacto no TIR de digestores de larga escala é o investimento inicial.

4.9 BARREIRAS PARA O SUCESSO DE DIGESTORES

O clima influencia diretamente no sucesso de digestores sem tecnologias de controle de temperatura (MARTÍ-HERRERO *et al.*, 2014; GOSENS *et al.*, 2013), o que não é um problema nas regiões tropicais, já que estas possuem uma temperatura média anual relativamente alta. Segundo Qu *et al.* (2013) as condições socioeconômicas, como pessoas mais jovens e renda familiar acima da média, e o clima da região têm influência no sucesso da implantação de digestores de pequena escala. Além disso, investimentos muito altos, falta de mecanismo de financiamento, preço competitivo de outros combustíveis, falta de informação e assessoria técnica são condições que causam o insucesso da aplicação de digestores em pequena e larga escala (MITTAL *et al.*, 2018). Finalmente, a falta de políticas de incentivo governamentais também é uma das causas de insucesso da implantação de digestores (MARTÍ-HERRERO *et al.*, 2014; GOSENS *et al.*, 2013; QU *et al.*, 2013; MITTAL *et al.*, 2018).

Existe uma relação direta entre a presença de políticas de incentivo governamental com o sucesso da implantação de biodigestores, como por exemplo o que acontece na União Europeia, uma das pioneiras em promoção e investimento em fontes renováveis de energia.

5. DISCUSSÃO

Existem vários tipos de digestores voltados para a produção de biogás, variando desde modelos simples e de fácil construção até grandes plantas de escala industrial com elevado rigor tecnológico. Mesmo entre modelos de mesma escala existem diversas variações nos processos que os tornam únicos e inovadores, principalmente para os de grande escala, onde investe-se muito em pesquisa e desenvolvimento sempre em busca da ampliação da eficiência energética e, conseqüentemente, do lucro. Desta forma, o escopo deste trabalho compreende os modelos mais encontrados na literatura de forma genérica, sem entrar nas especificidades que diferenciam os modelos de digestores que se enquadram em um mesmo padrão tipológico, ou seja, determinando o modelo ao qual o pertence o biodigestor através de suas características globais.

Pode-se concluir que os critérios de escolha para implantação de um modelo de digestor para produção de biogás são, em parte, subjetivos. Alguns fatores não determinísticos são importantíssimos e influenciam diretamente nessa escolha, como a cultura, principalmente para os modelos Indiano e Chinês, amplamente adotados na em seus países de origem. Todavia, diversos parâmetros objetivos foram observados ao longo do estudo, parâmetros esses que possuem grau de relevância igual ou superior aos subjetivos, dependendo do caso em questão. Dentre os parâmetros objetivos destacam-se o perfil socioeconômico dos investidores, o tipo de matéria orgânica a ser utilizada, a escala do digestor, o valor presente líquido do investimento e o fluxo de caixa positivo causado pela comercialização de energia e/ou biofertilizantes.

O método para elencar um possível melhor modelo de digestor só faz sentido quando relacionado com sua real finalidade, não existindo, portanto, um melhor modelo dentre os tipos de digestores apresentados neste trabalho, mas sim um modelo mais adequado para a situação com base nos parâmetros de comparação. Por isso a análise foi fracionada em modelos de pequena e larga escala de digestores, devido a disparidade entre os investidores alvo, bem como as particularidades, que em muito diferem, de cada um.

O modelo Tubular tem vantagens para implantações de média e pequena escala, devido ao baixo custo de implantação e a facilidade de construção e operação. Esse biodigestor é uma alternativa para disseminação do biogás entre as famílias rurais, representando a diminuição de custos para famílias que já possuem acesso a gás de cozinha e energia elétrica ou levando uma solução para aqueles que não tem acesso a fontes de energia renováveis. Em ambos os

casos, percebe-se a importância da intervenção de políticas governamentais para fomentar essa disseminação pelas comunidades, primeiramente, apesar de ser considerado uma tecnologia de baixo custo de implantação, a grande maioria do público alvo deste projeto não dispõe de quantias suficientes para investir ou optam por outros investimentos considerados de menor risco como a ampliação do rebanho. Além disso, a produção de biogás é uma tecnologia relativamente nova e pouco disseminada, portanto o grau de desconhecimento por parte do público em geral é alto, o que leva ao descrédito em relação a tecnologia e a dificuldade de atingir o sucesso esperado. Por último, existem exemplos onde a implementação de políticas governamentais foi considerada um sucesso, como na Alemanha, que hoje é referência nos estudos referente a implementação e modernização de plantas de biogás.

Os parâmetros determinísticos apontam que o investimento em um biodigestor em larga escala tende a ser mais vantajoso para o modelo CSTR, principalmente na simulação sem a necessidade de realização de empréstimo. Apesar desse modelo possuir menores taxas de produtividade, tanto em relação ao biogás quanto a produção de energia, quando comparado com outros leva vantagem pelo custo inicial do investimento e os custos com manutenção serem relativamente menores, o que vai ao encontro os dados obtidos com a análise de sensibilidade das variáveis, onde percebe-se que o valor presente líquido e a taxa interna de retorno são bastante sensíveis a elas. De acordo com a teoria de Monte Carlo, um investimento nessas condições em um modelo CSTR de grande escala, teria aproximadamente 39,0% de chances de retorno, ou seja, de possuir valor presente líquido positivo. Esse número pode ser entendido como sendo um investimento de médio risco, porém, teoricamente, não é considerado como uma probabilidade baixa de sucesso. Ademais, esse valor pode ser reduzido tendo-se conhecimento mais aprofundado dos processos e aumentando o grau de controle e rigor das plantas, bem como com o investimento em novas tecnologias mais eficientes.

O biogás é uma fonte de energia muito versátil, pode ser utilizada para gerar calor, produzir energia e combustível, tanto em pequenas como em grandes quantidades, por isso a escolha do modelo, bem como o volume do digestor a ser adotado é de suma importância para uma implantação com maiores chances de sucesso. Observando a variação dos parâmetros em relação ao volume dos digestores, percebe-se que o aumento no volume influencia diretamente no investimento inicial, porém aumenta o grau de retorno financeiro do investimento. Os diferentes volumes existentes para plantas de biogás são uma oportunidade de ampliação da matriz energética sustentável, auxiliando na geração de energia distribuída e oportunidade para suprir a necessidade de famílias rurais ou melhorarem suas condições de vida. Essas características fazem do biogás uma fonte de energia especial para desenvolvimento sustentável.

6. CONCLUSÃO

Dentro das limitações do presente estudo é possível concluir que:

1. Existem vários modelos de digestores para produção de biogás, desde modelos simples até os altamente complexos.
2. Os critérios de escolha para implantação de modelos de digestores são em parte subjetivos, como por exemplo a cultura local.
3. Todavia, diversos parâmetros objetivos, de relevância igual ou superior aos não determinísticos, foram observados: perfil socioeconômico do investidor, tipo de matéria orgânica, escala do projeto, valor presente líquido e fluxo de caixa positivo.
4. O método para elencar o possível modelo de digestor mais vantajoso só faz sentido quando relacionado com sua real finalidade, não existindo um melhor modelo, e sim um mais adequado para cada situação, o que levou ao fracionamento da análise realizada.
5. O modelo Tubular leva vantagens em implantações de projetos de pequena e média escala, devido ao seu baixo custo de implantação e sua facilidade de construção e operação, podendo ser uma alternativa para disseminação do biogás entre famílias rurais.
6. O modelo CSTR tende a ser mais vantajoso para aplicações em projetos de larga escala e, embora tenha menor produtividade de biogás e eletricidade, compensa com menor investimento inicial e custo de manutenção.
7. O biogás é uma fonte versátil, tanto em pequenas quanto em grandes quantidades.
8. A escolha do modelo de digestor correto é de suma importância para diminuir as chances de insucesso de sua implantação.

REFERÊNCIAS

- ABBAS, T.; ALI, G.; ADIL, S. A.; BASHIR, M. K.; KAMRAN, M. A. **Economic analysis of biogas adoption technology by rural farmers: The case of Faisalabad district in Pakistan**. *Renewable Energy*, 2017, 107: 431-439.
- DO AMARAL, A. C.; KUNZ, A.; TÁPPARO, D. C.; STEINMETZ, R. L. R. **Influência da carga orgânica volumétrica na recuperação de metano em um reator CSTR tratando dejetos suíno**. In Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola-CONBEA (Vol. 45). 2016.
- ANEEL. **Agência Nacional de Energia Elétrica**. Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br/a-aneel>>. Acesso: 26 mai. 2019.
- ALI, S.; ZAHRA, N.; NASREEM, Z.; USMAN, S. **Impact of biogas technology in the development of rural population**. *Pakistan Journal of Analytical & Environmental Chemistry*, 2013, 14.2: 10.
- ANDRADE, M. A. N.; RANZI, T. J. D.; MUNIZ, R. N. **Biodigestores rurais no contexto da atual crise de energia elétrica brasileira e na perspectiva da sustentabilidade ambiental**. *Proceedings of the 4th Encontro de Energia no Meio Rural*. 2002.
- BACEN. **Banco Central do Brasil - Cotações e Boletins**. 2018.
- Barbeli, M. C. **Análise do uso e das possibilidades do gás metano fóssil e de biodigestão nas frotas de veículos em São Paulo e outras regiões, nos anos 90**. 1998
- BENBELKACEM, H.; BAYARD, R.; ABDELHAY, A.; ZHANG, Y.; GOURDON, R. **Effect of leachate injection modes on municipal solid waste degradation in anaerobic bioreactor**. *Bioresource technology*, 101(14), 5206-5212. 2010.
- BLANK, L. T., TARQUIN, A. J. **Basics of engineering economy**. Boston: McGraw-Hill Higher-Education. 2008.
- BOTERO, RAÚL; PRESTON, THOMAS. **Biodigestor de bajo costo para la producción de combustible y fertilizante a partir de excretas. Manual para su instalación, operación y utilización**. Centro Internacional de Agricultura Tropical. Cali, Colombia, 1987, 353-362.
- CANCELIER, A., SOTO, U. P. D., COSTELLI, M. C., LOPES, T. J., SILVA, A. D. **Avaliação da produção de biogás de dejetos de suínos utilizando a metodologia de superfície de resposta**. *Eng. sanit. ambient*, 20(2), 209-217. 2015.
- CERVI, R. G. **Avaliação Econômica do aproveitamento do biogás e biofertilizante produzido por Biodigestão Anaeróbia: Estudo de Caso em Unidade Biointegrada**. São Paulo, 2009.
- CERVI, R. G.; ESPERANCINI, M. S. T.; BUENO, O. D. C. **Viabilidade econômica da utilização do biogás produzido em granja suinícola para geração de energia elétrica**. *Engenharia Agrícola*, 831-844. 2010.
- CHENICHARO, C. D. L. **Princípios do tratamento biológico de águas residuárias: reatores anaeróbios**. Editora UFMG, Belo Horizonte. 2007.
- CORCIOLI, G.; SIQUEIRA, C. R. **Programa Nacional de Fortalecimento da Agricultura Familiar (Pronaf)**. *Agricultura Familiar em Goiás*, 253. 2016.

- DAMACENO, F. M., HALMEMAN, M. C. R., GONÇALVES, M. S., DA SILVA MEDEIROS, F. V. **Aproveitamento agrônômico e energético de dejeções suinícolas: estudo de caso com análise econômico-financeira**. Revista Agro@mbiente On-line, 11(2), 174-180. 2017.
- DEGANUTTI, R.; PALHACI, M. C.; TAVARES, M. R.; SANTOS, B. C. **Biodigestores rurais: modelo indiano, chinês e batelada**. Proceedings of the 4th Encontro de Energia no Meio Rural, 2002.
- EPPS, M. I. **A atualização da contabilidade face á desvalorização monetária**. Revista de Administração de Empresas, 3(8), 29-47. 1963.
- GENERAL ELECTRIC. **Jenbacher Gas Engine Services, Maintenance and Repair**. GE Power. Disponível em: <<https://www.ge.com/br/>>. Acesso em: 23 mai 2019.
- GOSENS, J.; LU, T.; HE, G.; BLUEMLING, B; BECKERS, T. A. M. **Sustainability effects of household-scale biogas in rural China**. Energy Policy, 2013, 54: 273-287.
- IBGE. **Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística - Diretoria de Pesquisas, Coordenação de Índices de Preços**. 2018.
- HERRERO, J. MARTI. **Transfer of low-cost plastic biodigester technology at household level in Bolivia**. Livestock Research for Rural Development, 2007, 19.12.
- INSTITUTO DE ECONOMIA AGRÍCOLA. **Preços médios mensais pagos pela agricultura**. São Paulo, 2019. Disponível em: <http://ciagri.iea.sp.gov.br/bancoiea_Testes/pagos2.aspx?cod_sis=5>. Acesso em: 20 mai 2019.
- KARLSSON, T.; KONRAD, O.; LUMI, M.; SCHMEIER, N. P.; MARDER, M.; CASARIL, C. E.; PEDROSO, A. G. **Manual básico de biogás**. Lajeado: Ed. da UNIVATES. 2014.
- KELEBE, H. E.; AYIMUT, K. M.; BERHE, G. H.; HINTSA, K. **Determinants for adoption decision of small scale biogas technology by rural households in Tigray, Ethiopia**. Energy Economics, 2017, 66: 272-278.
- KUMARAN, P., HEPHIZIBAH, D., SIVASANKARI, R., SAIGUDDIN, N., SHAMISUDDIN, A. H. **A review on industrial scale anaerobic digestion systems deployment in Malaysia: Opportunities and challenges**. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 56, 929-940. 2016.
- MARTINS, F. M., DE OLIVEIRA, P. A. **Análise econômica da geração de energia elétrica a partir do biogás na suinocultura**. Embrapa Suínos e Aves-Artigo em periódico indexado (ALICE). 2011.
- MARTÍ-HERRERO, J.; CIMPANA, M.; CUEVAS, C.; PACO, G.; SERRANO, V.; ZYMLA, B.; HEISING, K.; SOLOGUREN, J.; GAMARRA, A. **Low cost tubular digesters as appropriate technology for widespread application: Results and lessons learned from Bolivia**. Renewable Energy, 2014, 71: 156-165.
- MARTÍ-HERRERO, J.; ALVAREZ, R.; FLORES, T. **Evaluation of the low technology tubular digesters in the production of biogas from slaughterhouse wastewater treatment**. Journal of Cleaner Production, 2018, 199: 633-642.
- MATTOS, LUIZ CLÁUDIO; FARIAS JÚNIOR, MÁRIO. **Manual do biodigestor sertanejo**. Recife: Projeto Dom Helder Camara, 2011.
- MELO, R. A.; SANTOS A. P. A.; UCHÔA M. B. C. **Análise da viabilidade técnica de geração de energia elétrica por biogás proveniente de resíduos orgânicos**. In: Congresso Técnico Científico de Engenharia e Agronomia, 72. Fortaleza, 2015.
- MINGOTI, R.; HOLLER, W.; SPADOTTO, C.; LOPES, V.; BRASCO, M. **Metodologia de análise crítica de dados estatísticos históricos sobre produção agropecuária**. Embrapa Gestão Territorial-Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento (INFOTECA-E). 2014.

- MIRANDA, A. C., SILVA FILHO, S. C., TAMBOURGI, E. B., CURVELO SANTANA, J. C., YANALLE, R. M., GUERHARDT, F. **Analysis of the costs and logistics of biodiesel production from used cooking oil in the metropolitan region of Campinas (Brazil)**. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 88, 373–379. 2018.
- MITTAL, SHIVIKA; AHLGREN, ERIK O.; SHUKLA, P. R. **Barriers to biogas dissemination in India: A review**. *Energy Policy*, 2018, 112: 361-370.
- MOURA, J. P. **Estudo do dimensionamento da produção de biogás com utilização de resíduos residenciais, industriais e de matrizes suínas a partir de uma revisão de literatura**. Santa Maria, Rio Grande do Sul. 2012.
- MUNIZ, J. V. R.; DOS SANTOS, W. M. T. **Estudo sobre a viabilidade do uso de resíduos sólidos para geração de energia de biogás no campus dom delgado da UFMA**. *Revista Brasileira de Iniciação Científica*, 4(6). 2017.
- OLIVEIRA, D. E. P. D. **Estudo de viabilidade da produção de energia elétrica a partir do biogás gerado pela biodigestão de resíduos sólidos orgânicos de uma central de abastecimento paulista**. 2019.
- PROBIOGAS. **O estado da arte da tecnologia de metanização seca**. 2015. Disponível em: <<https://www.giz.de/en/downloads/probiogas-metanizacao-rsu.pdf>>. Acesso em: 18 mai. 2017.
- QIAN, M. Y.; LI, R. H.; LI, J.; WEDWITSCHKA, H.; NELLES, M.; STINNER, W.; ZHOU, H. J. **Industrial scale garage-type dry fermentation of municipal solid waste to biogas**. *Bioresource technology*, 2016, 217: 82-89.
- QU, WEI; TU, QIN; BLUEMLING, BETTINA. **Which factors are effective for farmer's biogas use? – Evidence from a large-scale survey in China**. *Energy Policy*, 2013, 63: 26-33.
- SEBIGAS. **Empresa especialista em biodigestão – Biodigestor CSTR – Reator de Fluxo e Agitação Contínuos**. Disponível em: <<http://sebigascotica.com.br/tecnologia/cstr-biodigestor>>. Acesso em: 05 set 19.
- SILVA, M. D.; FONTES, A. A. **Discussão sobre os critérios de avaliação econômica: valor presente líquido (VPL), valor anual equivalente (VAE) e valor esperado da terra (VET)**. *Revista Árvore*, 29(6), 931-936. 2005.
- SCARLAT, N.; DALLEMAND, J.; FAHL, F.. **Biogas: developments and perspectives in Europe**. *Renewable Energy*, 2018.
- TORO. **Toro Investimentos, agenciamento para investimentos e mercado de ações**. Acesso: nov. 2018, Disponível em: <<https://www.toroinvestimentos.com.br/bolsa/investir/>>. 2018.
- TÔRRES, O. F. F. **Fundamentos da engenharia econômica e da análise econômica de projetos**. Thomson Learning. 2006.
- WAHYUNI, S.; SUTJAHJO, S. H.; PURWANTO, Y. A.; FUAH, A. M.; KURNIAWAN, R. **Application of small digester biogas for energy supply in rural areas**. In: *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. IOP Publishing, 2018. p. 012035.
- WAMWEA, Stephen Ngugi. **Success and failure of biogas technology systems in rural Kenya: an analysis of the factors influencing uptake and the success rate in Kiambu and Embu counties**. 2017. Master's Thesis. Norwegian University of Life Sciences.
- WANG, X., CHEN, Y., SUI, P., GAO, W., QIN, F., WU, X., XIONG, J. **Efficiency and sustainability analysis of biogas and electricity production from a large-scale biogas project in China: an energy evaluation based on LCA**. *Journal of cleaner production*, 65, 234-245. 2014.

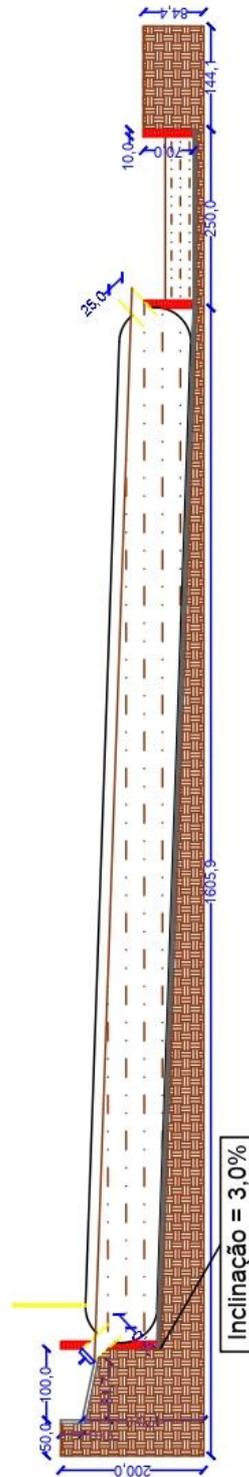
YORK, L.; HEFFEMAN C.; RYMER, C. **The role of subsidy in ensuring the sustainability of small-scale anaerobic digesters in Odisha, India.** *Renewable energy*, 96, 1111-1118. 2016.

ZILOTTI, H. A. R. **Potencial de produção de biogás em uma estação de tratamento de esgoto de Cascavel para a geração de energia elétrica.** Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Paraná. 2012.

ANEXO I – PROJETO DIGESTOR TUBULAR

MEDIDAS EM CENTÍMETROS

PERFIL HORIZONTAL



LEGENDA:

- TERRENO NATURAL
- ALVENARIA
- LÍQUIDO DIGESTADO

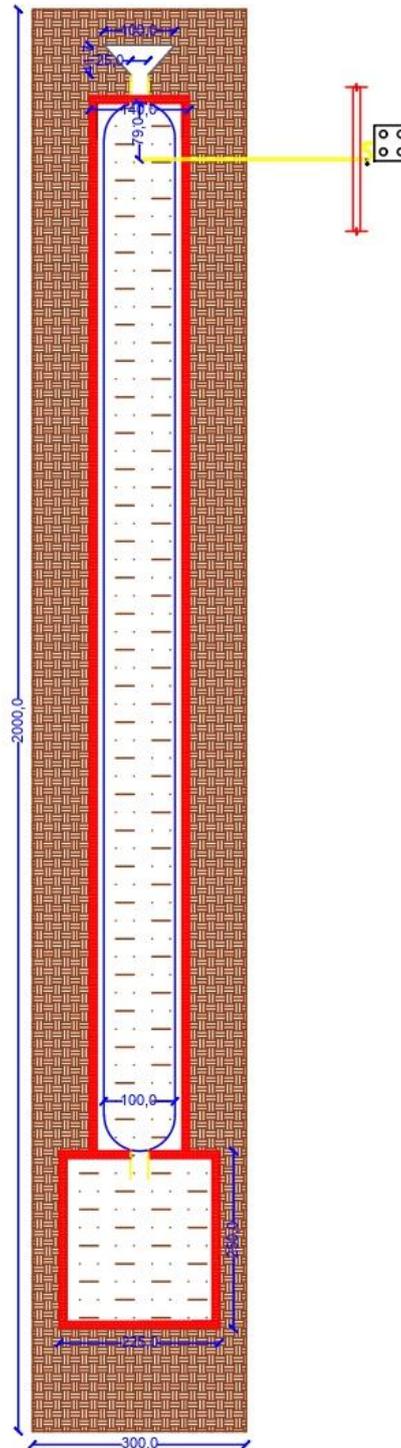
ESCALA 1:10

TÍTULO:	INSTITUTO FEDERAL DE GOIÁS - IFG	RESPONSÁVEL TÉCNICO:	LUCAS DA PAIXÃO ALCÂNTARA
ASSUNTO:	PROJETO DE BIODIGESTOR TUBULAR	ESCALA:	Indicada no Projeto
ORIENTADOR:	JOACHIM WERNER ZANG	FOLHA:	01/02
		REVISOR:	-
		DATA:	27/06/19

ANEXO I – PROJETO DIGESTOR TUBULAR

MEDIDAS EM CENTÍMETROS

PLANTA BAIXA



LEGENDA:

- TERRENO NATURAL
- ALVENARIA
- LÍQUIDO DIGESTADO

ESCALA 1:10

TÍTULO:	INSTITUTO FEDERAL DE GOIÁS - IFG	RESPONSÁVEL TÉCNICO:	LUCAS DA PAIXÃO ALCÂNTARA
ASSUNTO:	PROJETO DE BIODIGESTOR TUBULAR	ESCALA:	Indicada no Projeto
ORIENTADOR:	JOACHIM WERNER ZANG	FOLHA:	02/02
		REVISOR:	-
		DATA:	27/06/19

ANEXO II – ORÇAMENTO ESTIMATIVO

INSTITUTO FEDERAL DE GOIÁS MESTRADO PROFISSIONAL EM TECNOLOGIAS DE PROCESSOS SUSTENTÁVEIS ORÇAMENTO: IMPLANTAÇÃO DE BIODIGESTOR TUBULAR INCLUINDO MÃO DE OBRA								
ITEM	TABELA	CÓDIGO	DISCRIMINAÇÃO DOS SERVIÇOS	UNIDADE	QUANTITATIVO	PREÇO R\$		
						UNITÁRIO	PARCIAL	TOTAL
1.0	-	-	SERVIÇOS PRELIMINARES					
1.1	AGETOP CIVIL	20190	LIMPEZA MECANICA DE TERRENO	m2	60,00	0,15	9,00	
1.2	AGETOP CIVIL	20701	LOCAÇÃO DA OBRA, EXECUÇÃO DE GABARITO SEM REAPROVEITAMENTO, INCLUSO PINTURA (FACE INTERNA DO RIPÃO 15CM) E PIQUETE COM TESTEMUNHA	m2	60,00	2,96	177,60	
								186,60
2.0	-	-	SERVIÇO EM TERRA					
2.1	AGETOP CIVIL	41004	ESCAVAÇÃO MECANICA	m3	45,38	1,35	61,26	
2.2	AGETOP CIVIL	40905	APILOAMENTO MECÂNICO	m2	26,40	0,33	8,71	
								69,97
3.0	-	-	REVESTIMENTOS					
3.1	AGETOP CIVIL	220101	LASTRO DE CONCRETO REGULARIZADO IMPERMEABILIZADO 1:3:6 ESP=SCM (BASE)	m2	6,29	22,46	141,27	
3.2	AGETOP CIVIL	51024	PREPARO COM BETONEIRA E TRANSPORTE MANUAL DE CONCRETO PARA LASTRO - (O.C.)	m3	1,02	266,82	272,16	
								413,43
4.0	-	-	ALVENARIA					
4.1	AGETOP CIVIL	100160	ALVENARIA DE TJOLO FURADO 1/2 VEZ 14X29X9 - 6 FUROS - ARG. (1CALH4ARML+100KG DE C/M3)	m2	28,51	32,19	917,74	
								917,74
5.0	-	-	TUBOS E CONEXÕES					
5.1	AGETOP CIVIL	82301	TUBO SOLD.P/ESGOTO DIAM. 40 MM	m	1,00	9,50	9,50	
5.2	AGETOP CIVIL	81002	TUBO SOLDAVEL PVC MARROM DIAMETRO 20 mm	m	13,17	4,35	57,29	
5.3	AGETOP CIVIL	81320	JOELHO 90 GRAUS SOLDAVEL DIAMETRO 20 MM	Un	3,00	5,04	15,12	
5.4	AGETOP CIVIL	81065	ADAPTAD.SOLD.CURTO C/BOLSA E ROSCA P/REG.20X1/2"	Un	2,00	2,85	5,70	
5.5	AGETOP CIVIL	80901	REGISTRO GAVETA BRUTO DIAMETRO 1/2"	Un	1,00	24,88	24,88	
								112,49
6.0	-	-	CORPO DO DIGESTOR					
6.1	COMPOSIÇÃO	CP 01	EXECUÇÃO DE DIGESTOR TUBULAR (INCLUSO GEOMEMBRANA SOLDADA)	UN	1,00	527,93	527,93	
								527,93
7.0	-	-	DIVERSOS					
7.1	AGETOP CIVIL	140205	RIPAMENTO DE MADEIRA	m2	1,00	14,41	14,41	
7.2	AGETOP CIVIL	70218	ARAME DE AÇO GALVANIZADO No. 12 BWG	M	15,00	1,31	19,65	
								34,06
TOTAL								2.262,22

LEGENDA:
 AGETOP CIVIL SERVIÇOS AGÊNCIA GOIANA DE TRANSPORTES E OBRAS. TABELA DE SERVIÇOS OBRAS CIVIS DEZEMBRO/2018.
 COMPOSIÇÃO - COMPOSIÇÕES DE CUSTOS E SERVIÇOS

ANEXO II – ORÇAMENTO ESTIMATIVO

INSTITUTO FEDERAL DE GOIÁS							
MESTRADO PROFISSIONAL EM TECNOLOGIAS DE PROCESSOS SUSTENTÁVEIS							
COMPOSIÇÕES DE CUSTO E SERVIÇOS							
TABELA		CP 01	EXECUÇÃO DE DIGESTOR TUBULAR (INCLUSO GEOMEMBRANA SOLDADA)	UN	QUANT.	P. UNIT.	P. PARCIAL
AGETOP CIVIL	MO.	4	PEDREIRO	h	2,000000	15,53	31,06
AGETOP CIVIL	MO.	8	AJUDANTE	h	2,000000	9,51	19,02
COTAÇÃO	-	CT 01	LONA MANTA GEOMEMBRANA SOLDADA 0,3 MM	M²	45,553100	10,49	477,85
CUSTO TOTAL							527,93
<p>LEGENDA:</p> <p>AGETOP CIVIL MO. AGÊNCIA GOIANA DE TRANSPORTES E OBRAS. TABELA DE MÃO DE OBRA CIVIL DEZEMBRO/2018.</p> <p>COTAÇÃO - PREÇOS DE MERCADO</p>							

IDENTIFICAÇÃO DOS FORNECEDORES / DESCRIÇÃO DOS MATERIAIS	Fornecedor	FORNECEDOR A	FORNECEDOR B	FORNECEDOR C	Preço Adotado - Menor
	Razão Social:	MERCADO LIVRE	GBS GEO	NEOPLASTIC	
	CNPJ:	03.361.252/0001-34	21.283.688/0001-34	67.959.015/0001-52	
	Nome do Contato:	-	-	-	
	Data do Contato:	01/07/2019	01/07/2019	12/06/2019	
	E-mail/URL do Contato:	https://www.mercadolivre.com.br/	contato@gsgeo.com.br	representantes@neoplastic.com.br	
Telefone:	4020-1735	(14) 3304-0863	(11) 4443-1000		
Descrição	Unidade	Valor unit.	Valor unit.	Valor unit.	
LONA MANTA GEOMEMBRANA SOLDADA 0,3 MM	M²	R\$ 48,10	R\$ 38,57	R\$ 10,49	R\$ 10,49

ANEXO III – CRONOGRAMA FÍSICO FINANCEIRO

INSTITUTO FEDERAL DE GOIÁS MESTRADO PROFISSIONAL EM TECNOLOGIAS DE PROCESSOS SUSTENTÁVEIS CRONOGRAMA FÍSICO FINANCEIRO							
Item	Discriminação dos serviços	Parcial	Dia 01	Dia 02	Dia 03	Dia 04	Total
1.0	SERVIÇOS PRELIMINARES	186,60 8,25%	186,60 100,00%	-	-	-	186,60 100%
2.0	SERVIÇO EM TERRA	69,97 3,09%	69,97 100,00%	-	-	-	69,97 100%
3.0	REVESTIMENTOS	413,43 18,28%	413,43 100,00%	-	-	-	413,43 100%
4.0	ALVENARIA	917,74 40,57%	-	458,87 50,00%	458,87 50,00%	-	917,74 100%
5.0	TUBOS E CONEXÕES	112,49 4,97%	-	-	112,49 100,00%	-	112,49 100%
6.0	CORPO DO DIGESTOR	527,93 23,34%	-	-	527,93 100,00%	-	527,93 100%
7.0	DIVERSOS	34,06 1,51%	-	-	-	34,06 100,00%	34,06 100%
TOTAL SIMPLES		2.262,22	670,00	458,87	1.099,29	34,06	2.262,22
PERCENTUAL SIMPLES		100,00%	29,62%	20,28%	48,59%	1,51%	100%
TOTAL ACUMULADO			670,00	1.128,87	2.228,16	2.262,22	
PERCENTUAL ACUMULADO			29,62%	49,90%	98,49%	100,00%	

ANEXO IV – LISTA DE MATERIAIS

INSTITUTO FEDERAL DE GOIÁS MESTRADO PROFISSIONAL EM TECNOLOGIAS DE PROCESSOS SUSTENTÁVEIS LISTA DE MATERIAIS								
ITEM	TABELA	CÓDIGO	DISCRIMINAÇÃO DOS SERVIÇOS	UNIDADE	QUANTITATIVO	PREÇO R\$		
						UNITÁRIO	PARCIAL	TOTAL
1.0	-	-	MATERIAIS					
1.1	AGETOP MA.	H100	ADAPTADOR SOLD.CURTO C/BOLSA E ROSCA P/REG.20X1/2"	un	2,00	0,50	1,00	
1.2	AGETOP MA.	2426	ARAME GALVANIZADO No. 12 BWG	Kg	0,67	6,50	4,36	
1.3	AGETOP MA.	102	ARAME RECOZIDO 18	Kg	0,14	6,75	0,95	
1.4	AGETOP MA.	2804	AREIA GROSSA	m³	0,22	90,00	19,80	
1.5	AGETOP MA.	104	AREIA MEDIA	m³	1,07	82,85	88,65	
1.6	AGETOP MA.	2386	BRITA No. 01	m³	0,41	85,36	35,00	
1.7	AGETOP MA.	2497	BRITA No.02	m³	0,77	74,90	57,67	
1.8	AGETOP MA.	1221	CAL HIDRATADA	Kg	57,11	0,54	30,84	
1.9	AGETOP MA.	1215	CIMENTO PORTLAND C.P. 32	Kg	327,80	0,39	127,84	
1.10	AGETOP MA.	2779	COMPACTADOR DE PLACA VIBRATÓRIA A GASOLINA POTÊNCIA 3HP (MANUTENÇÃO E DEPRECIÇÃO DO EQUIPAMENTO) - PREÇO DO EQUIPAMENTO NOVO DIVIDIDO POR 1.000	un	0,07	3,00	0,21	
1.11	AGETOP MA.	H689	FITA VEDAROSCA 12 MM	m	0,90	0,28	0,25	
1.12	AGETOP MA.	2782	GASOLINA	l	0,50	4,76	2,38	
1.13	AGETOP MA.	H163	JOELHO 90 GRAUS SOLDAVEL DIAMETRO 20 MM	un	3,00	0,53	1,59	
1.14	AGETOP MA.	CT 01	LONA MANTA GEOMEMBRANA SOLDADA 0,3 MM	M²	45,55	10,49	477,82	
1.15	AGETOP MA.	1858	PONTALETE 3x3"	m	12,70	5,24	66,55	
1.16	AGETOP MA.	1860	PREGO 15x15	Kg	0,02	6,90	0,14	
1.17	AGETOP MA.	1861	PREGO 18x24	Kg	0,35	5,99	2,10	
1.18	AGETOP MA.	H204	REGISTRO DE GAVETA DIAMETRO 1/2" BRUTO	un	1,00	11,19	11,19	
1.19	AGETOP MA.	1964	RIPA DE MADEIRA 5x1	m	4,20	2,33	9,79	
1.20	AGETOP MA.	1967	RIPAO DE MADEIRA 15 CM	m	12,70	3,01	38,23	
1.21	AGETOP MA.	1973	SIKA 1 / VEDACIT (D=1,00) OU EQUIVALENTE	Kg	6,29	3,67	23,08	
1.22	AGETOP MA.	2710	TIJOLO FURADO 14X29X9 6 FUROS	un	655,73	0,43	281,96	
1.23	AGETOP MA.	2842	TINTA LATEX ACRÍLICA 2ª LINHA/ECONÔMICA	l	0,31	5,89	1,83	
1.24	AGETOP MA.	H285	TUBO SOLDAVEL P/ESGOTO DIAMETRO 40 mm	m	1,01	3,46	3,49	
1.25	AGETOP MA.	H269	TUBO SOLDAVEL PVC MARROM DIAM. 20 MM	m	13,30	2,10	27,93	
TOTAL								1.314,65
LEGENDA: AGETOP MA. AGÊNCIA GOIANA DE TRANSPORTES E OBRAS. TABELA DE MATERIAIS OBRAS CIVIS DEZEMBRO/2018.								